



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

Учебное пособие
по дисциплине
«Художественное материаловедение»

**«Раздел 2. Инженерное
художественное
материаловедение»**

Автор

Никифоров Б.Т.

Ростов-на-Дону, 2015

Аннотация

Широко представлены образцы художественных и ювелирных изделий, уникальные изделия из различного металла, шедевры ювелирного искусства и технологии их изготовления.

Издание предназначено для специалистов, работающих в области художественной обработки металлов, а также профессиональным и самодеятельным художникам декоративно-прикладного искусства, студентам и магистрантам, обучающимся в области художественной обработки материалов, эстетике и дизайна.

Автор



К.Т.Н., доцент
Никифоров Б.Т.



Оглавление

Раздел II. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ В ХУДОЖЕСТВЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ4

Глава 9. ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОДИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ ...4

- 9.1. Историческая справка 4
- 9.2. Общие сведения34
- 9.3. Сталь37
- 9.4. Чугун57

Глава 10. ЛЕГКИЕ СПЛАВЫ68

- 10.1. Алюминий и его сплавы68
- 10.2. Магний и его сплавы94
- 10.3. Титан и его сплавы103

ГЛАВА 11. Медь и ее сплавы..... 111

- 11.1 Медь111
- 11.2. Латуни120
- 11.3. Бронзы135
- 11.4. Иллюстрации бронзовых художественных изделий
.....151

РАЗДЕЛ II. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ В ХУДОЖЕСТВЕННОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ

ГЛАВА 9. ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОДИСТЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

9.1. Историческая справка

Природное металлическое железо встречается на поверхности Земли как самородное и как метеоритное.

Самородное железо встречается в виде мелких листочков и чешуек, вкрапленных в *базальты*, например в альбит $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$ и анортит $\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7]$ и др., и всегда содержит заметное количество никеля: аварит – до 2,8% и джозефинит – 50 % и более. Самородное железо ковко и тягуче, но весьма редко для доступного механического передела.

Метеоритное железо называлось «металлом с неба». По подсчетам на территории Древнего Ближнего Востока могло находиться до 1 млн. тонн железных метеоритов.

Наиболее ранние образцы обработанного железа, найденные на территории Древнего Востока, в Египте и Месопотамии, изготовлены из метеоритного железа, что устанавливается содержанием в них порядка 4-10% никеля.

В Ассирии на рубеже III и II тысячелетий до н.э. железо было в 40 раз дороже серебра и в 5-8 раз дороже золота.

Земное (металлургическое) железо. Наиболее ранними изделиями из земного железа, полученного из руды, являются железные клинки из Аладжа-Гуюка (2100 г. до н.э.); они были определены по результатам металлографического анализа.

Металлургия железа зародилась в Передней Азии в области культуры хатти (народа хатти). Хетты, прямые наследники хаттов [*Хеттское царство XVIII-XII вв. до н.э. в восточной Анатолии*], также умели получать из руды железо и, возможно, сталь («хорошее железо» для клинков).

Производство железа в Древней Армении, непосредственно примыкавшей к Хеттскому царству, начинается в XIII-XIV вв. до н.э., а в Западной Грузии – примерно в XII в. до н.э.

В XII в. до н.э., после падения Хеттской империи, железо распространяется среди разрушивших ее народов [«народов моря», населявших побережье Восточного Средиземноморья] и соседних народов.

В Древнем Египте изделия из железа имели или культовое, или ювелирное назначение. Наиболее ранние из них – полностью окислившиеся к моменту обнаружения бусы изготовлены из метеоритного железа, содержат примерно 7,5% Ni (3500 г. до н.э.); еще несколько небольших амулетов примерно середины II тысячелетия до н.э. также изготовлены из метеоритного железа. В гробнице Тутанхамона, умершего в XIV в. до н.э., найдено несколько миниатюрных изделий из железа, в том числе небольшой кинжал. Широкое распространение железо получило в VII в. до н.э.

В Древней Греции железо распространилось заметно раньше, чем в Древнем Египте. Так, Гомер (XI-X вв. до н.э.) упоминает о железных изделиях и железе как предмете обмена.

«Железный век» характеризуется изготовлением целых серий железных и стальных орудий труда в начале I тысячелетия до н.э.

Причины, препятствовавшие наступлению железного века:

1. Внутренние причины – использование бронзы в обрядовых целях.

2. Железные руды менее ярки, а потому менее заметны, чем медные, и плавка железа требовала более высоких температур.

3. Железо, получавшееся в примитивных горнах, было очень мягким и не сразу стало соперничать с бронзой в качестве материала для изготовления орудий труда и оружия.

Сыродутный процесс получения железа. Сыродутный процесс – процесс прямого восстановления железа из его окислов, минуя процесс самого расплавления железа.

Для возможности процесса восстановления железа из его окислов необходимо обеспечить три условия:

1. Введение окислов железа в зону нагрева в условиях восстановления.

2. Достижение температуры, при которой получается металл, пригодный для механической переработки.

3. Открытие действия добавок – флюсов, облегчающих отделение примесей в виде шлаков, что обеспечивает получение ковкого металла при невысоких температурах.

Первоначально железную руду использовали гончары Ближнего Востока как красящее вещество, изменявшее цвет глины до серого, керамики – до красного при окислении железа и до темно-серого или черного – при восстановлении железа из окислов.

Сыродутный способ производства железа, как и способ получения стекла, является следствием температурного потенциала, достигнутого цивилизацией, рис.55.

В горнах зажигали древесный уголь, в разгоревшийся огонь бросали руду и производили принудительное дутье из меха, расположенного за горном; вместе с тем пользовались природным ветром. Температура в горнах достигала 1450°C.

Температура, °C	Шихта	Продукт	Свойства
1565	Восстанавливаются Fe_2O_3		
1540			Производство стекла
1538	Восстанавливаются Fe_3O_4		
1420	Восстанавливаются FeO		
1350	Твердый чугун, руда (FeO) – пудлингование-процесс удаления углерода из жидкого чугуна	Крица и жидкий шлак	Проковка кусков крицы и их многократная прокатка
1200	Руда, древесный уголь, флюс	Крица и → отделившаяся шлакообразная масса $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ →	При ковке получается продукт; используется в стекловарении

960	Руда, древесный уголь, флюс (костная мука, CaO, P2O5)	Железная крица → (смесь тв. Fe и кашеобразных шлаков)	При ковке шлак выдавливается, а железо сваривается
960	Руда и древесный уголь	Губчатое железо →	Дляковки не пригодно
700	Руда и древесный уголь	Спеченная масса: Fe, Fe ₃ C, FeO, MnO, FeO·SiO ₂ , MnO·SiO ₂ →	При ковке рассыпается

Рисунок 55. Схема сыродутного процесса получения сварочного железа

Процесс восстановления начинался при температуре 500-600°C, и протекали следующие химические реакции:

1) $C + O_2 = CO_2$; 3) $Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2$;

2) $CO_2 + C = 2CO$; 4) $Fe_3O_4 + CO = 3FeO + CO_2$,
при температуре 900°C осуществлялось выделение частиц Fe:

5) $FeO + CO = Fe + CO_2$.

При температуре 1100-1200°C образовавшаяся на предыдущих этапах FeO принимала участие в шлакообразовании. Частицы железа сплавлялись при температуре 1300-1400°C в железные крицы. Жидкий шлак предохранял их от окисления. Крицы при высокой температуре проковывались, из них выжимался жидкий шлак и они превращались в монолитные куски железа. При необходимости эти куски методом кузнечной сварки соединяли в более крупные заготовки.

В стране басков в конце XVIII в. для получения 100 кг железа требовалось 312 кг руды (63, 99% Fe₂O₃, 5,13% Mn₂O₃, 12,2% SiO₂) и 340 кг угля, приготовленного из ясеня, клена и липы. С течением времени вместо подовых (земляных) печей стали

строить сыродутные горны, рис.56.

В рабочее пространство такого горна слоями загружали древесный уголь и измельченную руду. Из горна через боковое отверстие стекал шлак. После 4-8 часов рабочие при помощи железных стержней извлекали из горна слипшуюся губчатую массу, содержащую железные зерна вместе со шлаковыми включениями, – крицу. Затем крицу разделяли на части, проковывали на наковальне, придавая ей форму, нужную для продажи [2].

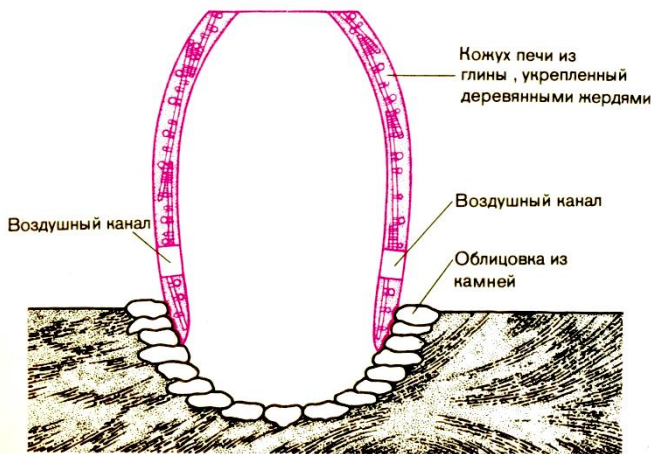


Рисунок 56. Сыродутный кричный горн представлял собой яму, над которой возвышалась куполообразная шахта с воздушными каналами для дутья. Крицу извлекали через пролом в стенке шахты [2]

На смену сыродутным горнам пришли рудоплавильные печи – домницы, в которых наряду с крицей получали и жидкий чугун. Удаление из чугуна углерода с целью получения ковкого железа получило название «кричного передела». Удаление углерода (выжигание) с помощью каменного угля получило название пудлингование (от английского слова puddle – месить, перемешивать). Сущность пудлингования заключалась в том, что твердый чугун загружался в рабочее пространство печи, в топке сжигался каменный уголь (в отличие от домниц, где процесс «кричного передела» осуществлялся на древесном угле при непосредственном контакте продуктов сжигания древесного угля с восстанавливаемой из руды крицей), и происходил процесс плавки чугуна. Расплав-

ленный чугун взаимодействовал с окислительным шлаком, углерод чугуна вступал в реакцию с закисью железа с образованием $C + FeO \rightarrow Fe + CO$; выделяющийся газ CO производил эффект кипения ванны, сильно перемешивал расплав, который по мере выгорания углерода становился тестообразным, т.е. образовывалась крица. Тестообразную крицу с помощью приваренного железного стержня по частям вынимали из печи и проковывали. На рис.57 показана схема пудлингования.

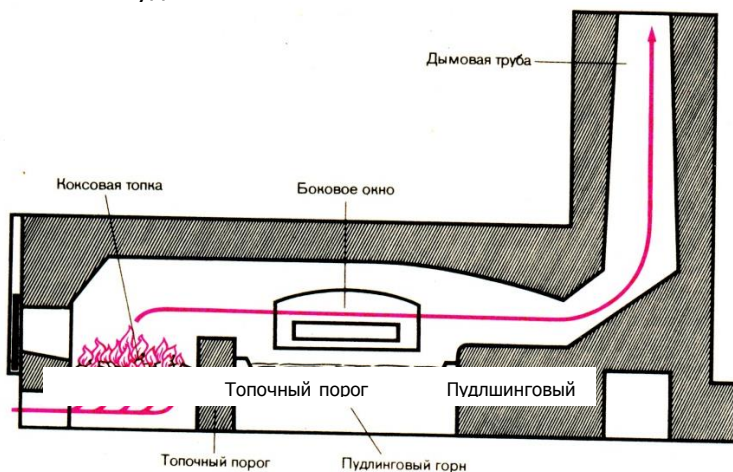


Рисунок 57. Схема пудлинговой печи [2]

Сыродутный процесс получения сварочного железа в Европе существовал вплоть до 1850 года, а в Северной Америке – даже до 1890 года [2].

И тем загадочнее и удивительнее является происхождение Делийского столба, рис.58. Делийский (кутубский) столб – древний монумент, высящийся на окраине индийской столицы. Высота его составляет чуть более 7 метров, диаметр у основания 40 сантиметров, у вершины 30 сантиметров. Легенды приписывают столбу мистические свойства исполнять любые желания, для этого надо только на минуту прижаться к нему спиной. Феномен же этого сооружения заключается в том, что оно было изготовлено из чистого железа 1600 лет назад и при этом ничуть не пострадало от коррозии. Палеоофологи считают Делийский столб специальным знаком, оставленным инопланетянами, посетившими когда-то Землю. Химики же считают, что отсутствие коррозии вовсе не инопланетных рук дело, а следствие особых климатических условий в районе Дели, когда на металле образу-

ется тонкая пленка не дающая прорасти ржавчине внутрь. Но истинная природа и происхождение Делийского столба окончательно пока не установлены.

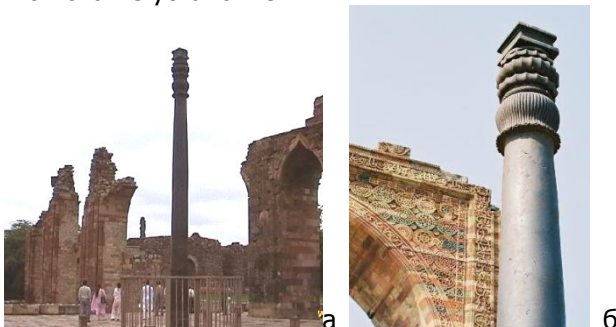


Рис.58. Делийский столб: а – общий вид, б – фрагмент верхней части столба

На протяжении многих столетий железо изготовлялось в Европе сперва в горнах, а затем в шахтных печах. Пламя в этих печах поддерживалось с помощью воздуходувных мехов, которые приводились в действие людьми, животными или водной энергией.

Чугун как литейный материал был изобретен в Китае в VI веке до н.э., о чем свидетельствует четырехзарядная чугунная пушка, отлитая в V веке, и другие многочисленные изделия [40].

В Древнем Китае чугун выплавляли в поворотных печах, рис.59.

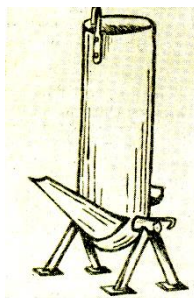


Рисунок 59. Поворотная китайская печь для плавки чугуна

Древняя Русь познакомилась с технологией выплавки чугуна в гг. Великие Булгары и Сарай Берке во времена Золотой Ор-

ды.

В начале XV века во Франции благодаря введению доменных печей стало возможным добывать железо в больших количествах. Воздуходувные мехи приводились в действие, как правило, водяными колесами. Выплавленный металл разливали по литейным формам, напоминающим свинью с поросятами – в Англии их прозвали «pig iron» («свинское железо»), в России – чушками. Заводы, выплавлявшие железо и чугун, могли существовать лишь в таких местах, где большие лесные массивы (для добычи древесного угля) соседствовали с рекой (для получения водной энергии), рис.60.

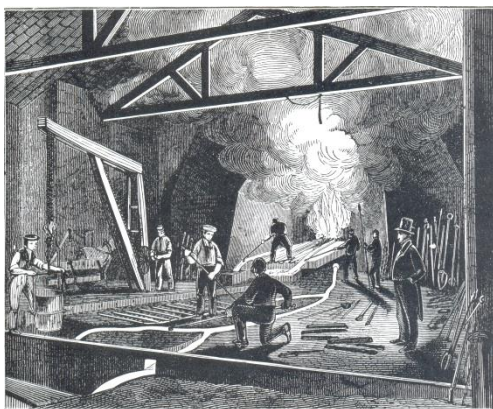


Рисунок 60. Чугуноплавильные заводы в Баттерли

Второй раз железный век наступил в 1709 году в Англии, когда Абрахам Дерби открыл способ выплавки чугуна с помощью кокса [29].

В XIX веке инженеры взяли на себя функции архитекторов, создавая все более смелые проекты фабрик и торговых зданий (рис.30), доков и железнодорожных вокзалов. Они ввели в обиход новый, основанный на идее металлоконструкций архитектурный стиль. Стальные мосты перекинулись через широкие бухты – ранее подобные задачи считались технически невыполнимыми. Стальные своды небывалых прежде размеров перекрывали перроны железнодорожных вокзалов.

В 1851 году для Всемирной выставки в Лондоне из заранее заготовленных металлических конструкций и стекла было возведено самое большое для того времени здание в мире – «Хру-

стальной дворец», рис.61. Это гигантское здание из чугуна и стекла длиной 554 м и высотой 42 м (что равносильно 16-этажному зданию) было построено из 2300 чугунных балок общим весом 3500 т, из них на стальные элементы приходилось всего 550 т.



Рисунок 61. Фрагмент «Хрустального дворца» (Кристалл-палас).

Архитектор Джозеф Пэкстон, 1851 год

На рис.62 показан чугунный мост, построенный в Англии Абрахамом Дерби и его инженерами; все детали моста отливались по отдельности и монтировались на месте, причем не болтами, а, как в столярном деле, клиньями и шипами.

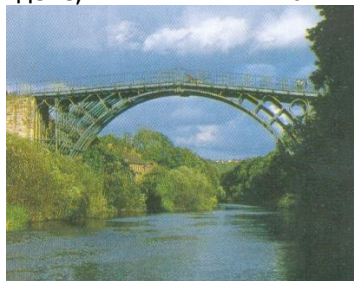


Рисунок 62. Чугунный мост через реку Северн

Мост был торжественно открыт в 1781 г., длина пролета моста 30,6 м, а его вес – 384 т.

Исаакиевский собор в Санкт-Петербурге, построенный в 1818-1858 гг. по проекту А.А. Монферрана, украшен скульптурами работы И.П. Витали, А.В. Логановского, его завершает чугунный купол диаметром 21,83 м, рис.63.



Рисунок 63. Свет проникает через 12 окон, опоясывающих барабан, на котором покоится чугунный купол величественного Исаакиевского собора, XIX век

Расцвет статуарного литья из чугуна относится к началу 20-х годов XIX века [35]. В это время возникает дискуссия о возможности применения чугуна для художественных отливок. В 1830 году выходит брошюра под язвительным псевдонимом Противочугунов, в которой критикуется мнение скульптора П.П.Соколова, выступившего с восхвалением превосходных литейных и статуарных качеств чугуна. П.П.Соколовым было оформлено три Петербургских моста: Львиный, Бакшевский и Египетский. Декоративная скульптура мостов была отлита из чугуна, за исключением крыльев грифонов Банковского моста, которые выполнены из листовой меди, рис.36-38.

Неизвестный противник чугуна писал: «Мода иногда заставляет слишком увлекаться новостью и забывать и отстранять бронзу, то есть то, что веками и опытом, и вкусом признано истинно полезным. Чугун не способен передавать ваятельные и скульптурные произведения».

В Санкт-Петербурге также были построены первые чугунные мосты: «Народный», «Красный», «Синий», «Поцелуев».

Катастрофическое наводнение 1824 года разрушило и повредило очень много деревянных мостов. Поэтому во второй половине 1820-х годов и в 1830-х годах в русской столице построили несколько чугунных мостов. По проектам П. Базена, Е. Адама и Г. Третера – педагогов Петербургского института путей сообщения – был создан ансамбль в верхнем течении Мойки между Инженерным (Михайловским) замком и Дворцовой площадью. На этих мостах установлены очень красивые металлические решетки

Инженерное художественное материаловедение

и фонари, поражающие почти ювелирной тщательностью исполнения. Арки чугунных мостов украшены разнообразными декоративными накладками и кронштейнами, также отлитыми из чугуна (рис. 33).

«Львы держат мост» - не правда ли, это звучит несколько странно? И все же в Санкт-Петербурге есть такой мост. Он расположен на красивом изгибе канала Грибоедова, неподалеку от Театральной площади, и так называется – Львиный. На его устоях – четыре чугунных льва.



1



2

Рисунок 64. Львиный мост. Санкт-Петербург (1) и Грифоны Банковского моста. Санкт-Петербург (2)

Дружно опираясь лапами, откинув головы на мускулистых шеях, они держат в своих пастях тонкие железные цепи, к которым подвешен настил моста. Красивый, сильный зверь не только украшение, внутри него помещена конструкция из металлических стержней, удерживающих цепи. Композиция моста – интереснейший пример синтеза инженерной конструкции и монументальной скульптуры. Львиный мост построен по проекту инженера Г. Трегера в 1825-1826 гг [26].

Замечательным архитектурным монументом из чугуна является «Памятник русским гренадерам, павшим в боях под Плевной». Форма памятника в виде часовни была разборной, отдельные отливки подгонялись и скреплялись болтами, рис.65.



Рисунок 65. Памятник-часовня гренадерам—героям Плевны. Архитектор и скульптор [В. И. Шервуд](#), инженер-полковник А. И. Ляшкин. Чугун Москва, 1887 год

История часовни-памятника. Памятник сооружён в 1887 по инициативе Русского археологического общества и офицеров и солдат Гренадерского корпуса, расквартированного в Москве, и собравших на его постройку 49 тыс. рублей. Чугунная восьмигранная часовня завершена шатром с православным крестом, опирающим мусульманский полумесяц. Её боковые грани украшены 4 горельефами: русский крестьянин, благословляющий сына-гренадера перед походом; янычар, вырывающий ребёнка из рук матери-болгарки; гренадер, берущий в плен турецкого солдата; русский воин, срывающий цепи с женщины, олицетворяющей Болгарию. На гранях шатра надписи: «Гренадеры своим товарищам, павшим в славном бою под Плевной 28 ноября 1877 г.», «В память войны с Турцией 1877—78 годов» и перечень основных сражений — «Плевна, Карс, Аладжа, Хаджи-Вали». Перед памятником — чугунные тумбы с надписями «В пользу увечных гренадер и их семейств» (на них стояли кружки для пожертвований). В интерьере часовни, отделанном полихромными изразцами, помещались живописные образа Александра Невского, Иоанна Воина, Николая Чудотворца, Кирилла и Мефодия, бронзовые плиты с именами погибших гренадеров — 18 офицеров и 542 солдат. Торжественное открытие памятника 28 ноября 1887, в день 10-летия взятия Плевны, было отмечено парадом частей Гренадерского корпуса, принятого генерал-фельдмаршалом великим князем Николаем Николаевичем Старшим; городскому голове Н.А. Алексееву был вручён акт о передаче памятника-часовни Москве. После 1917 большая часть внутреннего убранства была утрачена. В 1990 возобновлена традиция отмечать 3 ноября

(день освобождения Болгарии от турецкого владычества) панихидой у стен часовни. [Литература: Аникин В.В., Памятник гренадерам, павшим под Плевной, М., 1986.]

Художественные особенности. Чугунный восьмигранный шатёр-часовню на низком постаменте венчает православный крест. Отлитые из чугуна детали собирались и монтировались с идеальной точностью — на поверхности не видно ни единого шва. В 1886 году Владимир Осипович создал проект оформления площадки вокруг памятника. Братья Бромлей по рисункам Шервуда сделали отливку деталей ограды: 14 чугунных колонн с венками и 12 чугунных гирлянд. Последний заказ — бронзовые части памятника — доставили с фабрики Постникова осенью 1886 года. 27 июля 1887 года состоялась торжественная закладка памятника. Памятник в Нескучном саду разобрали и перевезли в Лубянский сквер. Значительный уклон сквера заставил скульптора устроить высокую площадку под основание, чтобы памятник просматривался со всех сторон. Поскольку монумент много весил, нужен был прочный фундамент. Шервуд сделал блестящий инженерный расчет. Время это подтвердило — памятник так и не дал осадки.

На мощном основании собрали каркас и смонтировали восьмерик. Массивный восьмигранный шатер покоится на низком каменном цоколе с тремя ступенями. На боковых гранях нижнего яруса памятника расположены четыре горельефа.

В основании горельефов укрепили позолоченные изображения перевитых лентами лавровых венков, в верхней части всех арок и карниза смонтировали лавровую гирлянду. Горельефные изображения и кресты сразу же приобрели более торжественный вид.

«Чугунная малая призма с четырех сторон ограничивалась кокошниками, — пишет в своей книге В.В. Аникин, — которые словно в рамки укрепили четыре небольших золоченых барельефа. Карнизы кокошников украсила в виде полосы декоративная отделка из четырех треугольников. Важной частью памятника явился конус, поддерживающий кокошники разных размеров: 16 по окружности меньшей величины и 8 — большей величины, расположенных над рядом из 16 кокошников. За последним рядом кокошников собрали пирамидку со штампованными украшениями и верхним шаблоном.

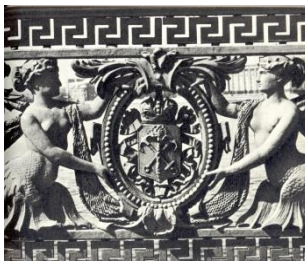


Рисунок 66. Скульптурные украшения Литейного моста. Санкт-Петербург

Из чугуна в большом количестве отливали художественные решетки и ограды, рис. 66. В работе [39] приводится следующая легенда о Санкт-Петербургских оградах: «Когда-то в Санкт-Петербург приехал пожилой знатный англичанин.



Рисунок 67. Решетка Летнего сада. Выполнена по проекту Ю. Фельтена и П.Е. Егорова, 1770-1784 гг.

Усевшись на раскладном стульчике против решетки Летнего сада (рис. 67), он целую ночь любовался этим творением, обогащенным отсветами белой ночи. Утром англичанин отправился обратно в Лондон, при этом заявил: «Теперь я могу спокойно умереть. Я видел совершенство красоты и гармонии».

Замечательным творением из чугуна является знаменитый Каслинский павильон для Всемирной выставки в Париже в 1900 г. Проект павильона был разработан архитектором Е.Е. Баумгартеном и изготовлен на Каслинском заводе в 1888 г. Огромный, почти 5-метровой высоты, с площадью более 100 м² павильон кажется сплетенным из литых кружев многочисленных мотивов самой причудливой вязи. Архитектура была выдержана в византийском стиле, а художественное оформление тесно связана с традициями древнерусского искусства. Павильон состоит из

множества литых чугунных деталей, которые отразили все жанры художественного литья: кабинетную структура, тонкие горельефы, филигранный сквозной орнамент, архитектурные детали и чеканные барельефы. Каждая деталь этого произведения искусства, начиная с нижнего карниза, обрамляющего павильон, полированного барьера или колонн и кончая самым маленьким уголком, рамкой или выступом, сложным горельефом или ажурнейшим орнаментом, выполнена с необычайным мастерством, тонкостью и изяществом, рис. Центральной, неотъемлемой частью павильона является чугунная скульптура, символизирующая Россию, рис.68.



Рисунок 68. Касли. Статуя «Россия». Скульптор Н. Леверецкий, формовщик К. Тарасов

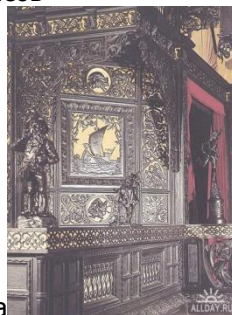
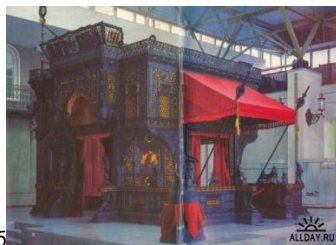


Рисунок 69. Каслинский павильон (а) и фрагмент (б); фотографии взяты из интернета

Закончим рассказ о чугуне представлением изделий мелкой художественной пластики. Всемирно известными являются изделия уральских заводов Касли, Кусы, а также еще мало изученное художественное литье таких литейных заводов, как Каменский,

Кушвинский, Верх-Исетский, Сысертский и др., рис.70, 71.



Рисунок 70. Касли. Поездка на праздник. Чугун.1880-1890гг



Рисунок 71. Касли. Киркиз на лошади. Чугун. 1904г

Чугун является хорошим материалом для художественного литья – он самый дешевый и недефицитный из металлических сплавов и обладает многими замечательными литейными и технологическими свойствами. Чугун усиливает массивность изображений, подчеркивает изящество ажурных отливок, увеличивает торжественность монументальных произведений, оттеняет смешные, приятные или неожиданно схваченные обычные нотки в кабинетных изделиях.

Бурное развитие черной металлургии отрицательно сказывалось на экологии планеты, рис.72.

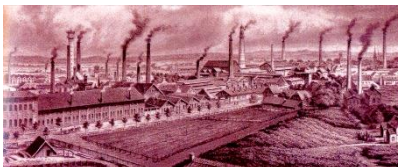


Рисунок 72. Крупный промышленный центр Эссен в Германии

десятками труб изрыгал в небо черный дым. Последняя четверть XVIII века

Кованные изделия из стали. Для изготовления решеток, ко-

Инженерное художественное материаловедение

ванных ворот, бытовых предметов, хозяйственных и архитектурных предметов используется малоуглеродистая сталь с содержанием углерода до 0,25 %. Она обладает достаточной прочностью (σв до 450 МПа) и высокой пластичностью (δ до 30%), хорошо подвергается пластической деформации в холодном и, особенно, в нагретом состоянии; умелые руки кузнеца из нее могут сотворить чудесные изделия, рис. 73-77.



Рисунок 73. Царь Николай II и царица Александра Федоровна на балконе Зимнего дворца перед объявлением о вступлении России в Первую мировую войну, 2 августа 1914 г.



Рисунок 74. Каминная решетка из стали и бронзы работы тульских оружейников. 1780-е годы. Екатерининский дворец, г. Пушкин



Рисунок 75. Центральные ворота дворцовой ограды. Архитектор В. Растрелли. 1750-е годы. Екатерининский дворец, г. Пушкин



а



б

Рисунок 76. Европейские кованые изделия: а - фрагмент кованой ограды балкона конца XVIII в. из Франции; б – кованый сундук Армады из Нюрнберга, XVI в.



Рисунок 77. Решетчатые ворота, увенчанные орлами, королевским гербом и короной. Версаль, Франция. XVII-XVIII вв.

Холодное оружие и средства личной защиты. Для этих целей требуется высокоуглеродистая (крепкая) сталь с содержанием углерода в пределах 0,8-1,3 %. Боевое оружие – вещь довольно утилитарная. В ней мало места для украшения. В старой русской армии были строго регламентированные образцы холодного, или, как прежде на Руси называли, белого оружия, поэтому отступление от этих образцов редко допускалось, рис.78.



а



Рисунок 78. Русское холодное оружие: а – сабля жалованная казачья. XVIII в. Сталь; б – шашка. Нач. XX в. Северный Кавказ. Сталь, серебро, чернь. Областной музей краеведения, Ростов-на-Дону; в – сабля и ножны. Мастер И. Просвит. XVI в. Оружейная палата. Москва

В старой русской и Советской армии существовал институт наградного оружия. Награда называлась «Золотым оружием». Перед Первой мировой войной оно было причислено к статусу ордена Святого Георгия и стало называться Георгиевским оружием. Высший генералитет русской армии награждался «Золотым оружием» с драгоценными камнями. Таких наград было очень мало.

В советское время этот институт награждения оружием был возобновлен в 1968 году в честь 50-летия Советской армии. Была вручена 21 награда выдающимся военным, командовавшим в Великую Отечественную войну крупнейшими военными соединениями: Ворошилову, Буденному, Жукову, Казакову и другим военачальникам. Награда называлась «Почетное оружие с золотым изображением Герба СССР». Позднее этой награды были удостоены только Фидель Кастро и Л. И. Брежнев, рис.79.



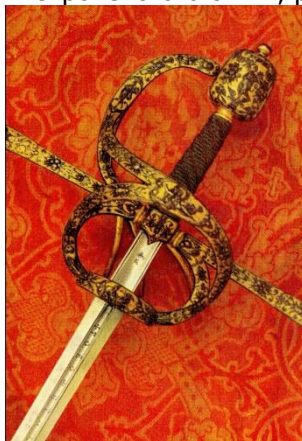
Рисунок 79. Почетное оружие с золотым изображением Герба СССР. Военно-исторический музей артиллерии, инженерных войск и войск связи. Санкт-Петербург

Восточное холодное оружие зачастую включает большое

количество золотого украшения и драгоценных камней и демонстрирует влиятельное положение владельца. Роскошность холодного оружия была характерна и для европейского стиля, рис.80.



а



б

Рисунок 80. Образцы европейского холодного оружия: а - эту великолепную шпагу император Максимилиан II в 1575 г. вручил в подарок саксонскому курфюрсту Августу. Клинок испанских кузнецов украшен эфесом ювелирной работы; б – рапира Даниэля Заделера. Мюнхен, 1600 год

В производстве оружия из «настоящей» дамасской стали славились древнеиндийские металлурги. В словаре Брокгауза-Ефрона сказано, что булат, или, по-другому, дамасская сталь – азиатская узорчатая сталь для клинков холодного оружия, получается свариванием и проковкой цементной стали, причем слои при проковке перепутываются и дают на поверхности клинка разнообразные рисунки. Булат готовится первобытным способом, но превосходного качества, главным образом в Индии и Хорасане (Персия), где издавна куются знаменитые клинки. Другие клинки, кроме старых дамасских и толедских, значительно хуже.

Название «дамасская сталь» произошло от имени сирийской столицы – города Дамаск, который был крупнейшим восточным торговым центром.

В Средние века секрет производства булатной (дамасской) стали был потерян и только в 1841 году был вновь открыт русским металлургом П.П.Аносовым и описан в работе «О булатах».

По Аносову: булатами называется всякая сталь, имеющая узорчатую поверхность. Виды булатов: табан, кара-табан, хо-

расан, кара-хорасан, гынды, кум-гынды, нейрис и шам. Достоинство булатов познают азиатцы по узору, по цвету грунта или промежутков между узорами, по отливу поверхности при косвенном направлении лучей света. Лучшими булатами считаются табан, кара-табан и кара-хорасан, а худшим – шам, который включает в себе преимущественно продольные узоры.

Химический состав булатов и характеристика свойств булата по данным различных авторов: П.П.Аносов: $C=1,3-1,5\%$, Н.И.Беляев: $C=1,1-1,3\%$; узоры по Д.К.Чернову: результат дендритной ликвации, по А.П.Виноградову: результат неоднородности стали вследствие недостаточно высокой температуры и неполного расплавления металла, по Н.Н.Беляеву: результат характера кристаллизации стали. Чем медленнее процесс кристаллизации и чем больше в стали углерода, тем более крупными являются узоры [41].

Технология получения булата:

1. Состав: совершенство булата зависит от чистоты железа и углерода, а твердость его – от количества последнего.

2. Способы приготовления булатов:

- сплавление железных руд с графитом или восстановление и соединение железа с углеродом (древний способ);

- сплавление железа при доступе углей или соединении его предварительно с углеродом и восстановление его посредством закисы железа;

- или с помощью продолжительного отжигания без доступа воздуха;

- и, наконец, сплавление железа непосредственно с графитом или соединении прямо с углеродом (современный способ).

3. Плавка: шихта (10-12 фунтов железа), на нее полагается состав, приготовленный из графита, железной окалины и флюса (горновой камень и (или) доломит. Тигель закрывается глиняной крышкой. Сильный жар. Время плавки – 5 часов и более. Охлаждение тигля вместе с печью. Сплавов в центре имеет усадочную раковину.

4. Отжиг производится для улучшения ковкости и проявления узоров. Литые заготовки (сплавки) загружают в чугунный ящик, закрывают железными листами и края засыпают песком. Нагрев медленный (3 дня) до прокаливании докрасна, выдержка от 3 до 9 суток. Сталь после отжига удобнее куется, мягче в опилке, менее подвергается короблению в закалке и стойче после оной.

5. Проковка. Сплавков нагревают при слабом дутье в горне, относят молот и кладут на наковальню широким основанием. Проковку начинают на тихом ходу молота, поворачивая слиток в одну сторону. При первоначальной проковке повторяют нагревы от 3 до 9 раз. Если сплавков не получил трещин, то его рассекают на 3 части зубилами. Чем медленнее проковывается булат и чем чище отсекается, тем он лучше. Разрубленные части идут опять в ковку под молот, где их сначала проковывают в правильные бруски, а потом в полосы: чем медленнее стынет металл под молотом, тем выше его достоинство. Если часть полосы нагреть добела, то при твердом булате она лишается ковкости, а при мягком теряет узоры. Никакая сталь не должна перегреваться при ковке.

6. Ковка изделий. Приемы при ковке наблюдаются те же самые, какие и при всякой другой стали, но только нагревать должно сколь возможно менее и не более мясно-красного цвета; а окончательная ковка, или наклепка, не требует и этой степени жара, а довольно, если металл будет нагреваться до вишнево-красного.

7. Калка. Нагрев откованную вещь докрасна, погружают ее в горячее сало и, дав ей время остыть, вынимают, обтирают и с одной стороны вычищают точильном камнем для дальнейшего наблюдения за появлением цветов (побежалости при отпуске). Нагревание закаленной стали называется отпуском, и главнейшие степени его по цветам суть: желтый, фиолетовый, синий, зеленый. Желтый цвет означает самую малую, а зеленый – самую большую степень отпуска, при которой упругость начинает теряться. Изделие снова немного нагревают над углями и наблюдают за появлением цветов; например, при закалке сабельного клинка у ручки отпускают до зеленого цвета, а у конца до синего, а в середине – до фиолетового, стараясь, чтобы на месте удара у лезвия оставался желтый цвет. Клинок, таким образом, отпущенный, выправляется (рихтуется) острым молотком и еще горячий погружается в холодную воду. Подобным образом закаливается всякое булатное оружие. Но если хотят вместо наибольшей стойкости получить наибольшую упругость, то в таком случае отпуск делается ровный, как в середине, так и в конце клинка, до синего цвета.

По современным представлениям структура булата после термической обработки должна представлять мелкозернистый цементит на фоне отпущенного троосто-мартенсита (прим. наше – Б.Т.).

8. Точка и полировка. При точке и полировке необходимо следить, чтобы режущая кромка не нагревалась выше желтого или синего цвета. Лучше ее проводить на мокрых точилах.

9. Вытравка. Персидский железный купорос, содержащий, кажется, часть сернокислой глины, почитается лучшим средством для вытравки клинков. Для составления протравы он предварительно кипятится с водой в свинцовом сосуде. На 1 штоф (1,23 л) воды употребляют до 1/4 фунта купороса. Вытравляемый клинок должен быть совершенно чист и свободен от масла и др. жирных частей; клинок предварительно очищают мелкой золой или щелоком, обмывают в чистой воде и потом опускают в теплый раствор или раствором часто поливают, держа клинок над сосудом с раствором. Когда узоры и грунт обнаруживаются, то вынимают клинок, обмывают несколько раз щелоком и холодной водой и потом с возможной скоростью обтирают клинок досуха, стараясь как можно слабее прикасаться сухой льняной ветошью к клинку. Узоры также выявляются при смачивании клинка лимонным соком, пивным уксусом. Протравленный клинок смазывают деревянным маслом и вытирают, рис. 81.

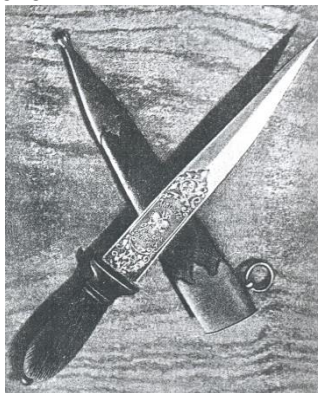


Рисунок 81. Булатный кинжал, изготовленный на Златоустовской оружейной фабрике, где директором работал П.П.Аносов. Кинжал изображен на фоне, представляющем увеличенное изображение узора поверхности клинка [41]

В России холодное оружие изготовлялось на знаменитой Златоустовской фабрике. В Оружейной палате Московского Кремля находятся интересные экспонаты из булатной стали, [11]. На

рис. 82-83 приводятся два экспоната из булатной стали.

Нержавеющие стали – это такие стали, которые не подвергаются коррозии в различных агрессивных средах. Основным компонентом состава нержавеющих сталей, обеспечивающим коррозионную стойкость, является хром (Cr), содержание которого по массе превышает 13%. На поверхности стали образуется очень прочная и плотная пленка Cr_2O_3 , которая препятствует окислению стали. По структуре нержавеющая сталь подразделяется на ферритную и аустенитную. Другие структуры в данном случае мы не рассматриваем. Малоуглеродистая (с содержанием углерода около 0,08% и хрома 13-18%) имеет ферритную структуру, обладает достаточной прочностью (300-500 МПа) и высокой пластичностью ($\delta=20$ и более процентов), легко обрабатывается резанием и методами пластической деформации, хорошо сваривается, полируется до зеркального блеска и имеет слегка синеватый красивый цвет. Идет на изготовление различных изделий для пищевой, химической, медицинской, бытовой и иных целей, а также для изготовления изделий художественного назначения. Если в хромистую нержавеющую сталь добавить 10 и более процентов никеля, то получим аустенитную структуру, еще более устойчивую в коррозионном отношении. На практике очень широкое применение нашла сталь марки X18H9T (типа «цепторовской»). Эта сталь обладает аналогичными свойствами, как и ферритная, но имеет более серебристый приятный цвет (см. рис. 86-90).



Рисунок 86. Рабочий и колхозница. В. И. Мухина. Нержавеющая сталь.

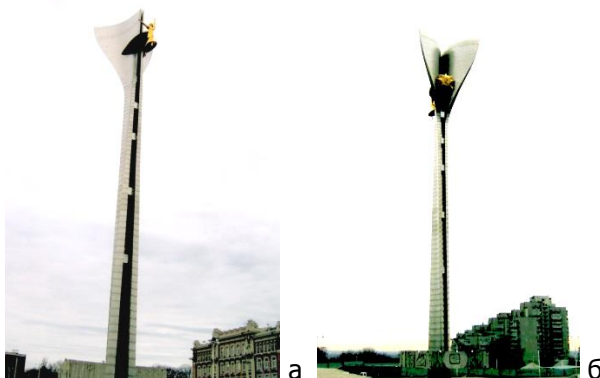


Рисунок 87. Стела из нержавеющей стали с богиней Ника на лицевой стороне (а) и орденом Отечественной войны – на обратной (б). Город Ростов-на-Дону.



Рисунок 88. Стилизованные чеканные изображения советского народа-созидателя. Нержавеющая сталь. Дворец культуры завода «Красный Аксай», г. Ростов-на-Дону



Рисунок 89. Монумент "Родина-мать". Скульптор [Василий Бородай](#). Киев, 1981 г.

Монумент "Родина-мать" в Киеве, рис 89. Высота скульптуры (от пьедестала до кончика меча) — 62 м, а с пьедесталом — 102 метра. Весит это все 450 тонн. Стальную обшивку сварили специалисты Института электросварки имени Патона. Суммарная длина швов составила около 30 км. На ее изготовление ушло 5500 тонн бетона и 2400 тонны железных конструкций. Впервые в СССР скульптура таких размеров была изготовлена на Киевском заводе им. Парижской Коммуны с учетом рекомендаций института электросварки им. Е.О. Патона из листов нержавеющей стали размером 50х50 см и толщиной 1,5 мм отдельными блоками-секциями, весом 25-30 т. На рис. 90 б видны фрагменты отдельных листов нержавеющей стали и сварные швы.

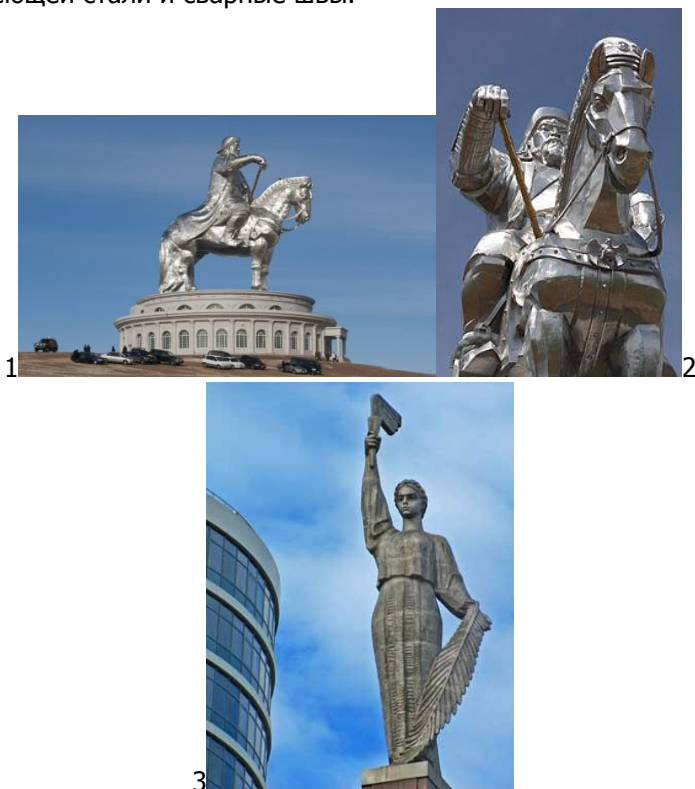


Рисунок 90. Конная статуя Чингисхана, Д. Эрдэнэбилэг. 2008. [Монголия](#), [Тыве](#), [Эрдэнэ](#), Цонжин-Болдо. Высота статуи –

40 м без учёта десятиметрового постамента. Изваяние покрыто нержавеющей сталью весом 250 тонн (1,2); Скульптура монумента «Родина-мать». Нержавеющая сталь. Литье. Днепропетровск. 1967г.(3)

Монумент Вечной славы в г. Днепропетровске, рис 9-3, высотой 9 м, отлит из нержавеющей стали методом литья по выплавляемым моделям по отдельным частям (кускам). Отлитые куски после чеканки собирали и сваривали в единое целое. Толщина стенок отливки составляет 10-25 мм. Плавку металла осуществляли в электропечах. Препятствием для широкого применения такой стали как материала для монументальных скульптур являются ее низкие литейные свойства.

Украшения из нержавеющей стали – это, как правило, украшения для мужчин: браслеты (в т. ч. для часов), кулоны, кольца, запонки, изготовленные в комплекте и в одном стиле с зажигалкой, авторучкой, кольцом для ключей и т. п.

Сталь в уникальных сооружениях мира. Эйфелева башня – стальная башня, сооружена по проекту А.Г.Эйфеля в Париже для Всемирной выставки 1889 года как символ достижений техники в XIX веке. Используется как обзорная и радиотехническая башня (рис.91).

Рисунок 91. Эйфелева башня. 1889 год, Париж

В горизонтальной проекции Эйфелева башня опирается на квадрат площадью в 1,6 гектара. Вместе с антенной ее высота составляет 320,75 м, она весит 8600 т, и, как уверяют специалисты, в процессе ее постройки было заклепано 2,5 миллиона заклепок.

12000 деталей для башни изготавливались по точнейшим чертежам. Самая высокая по тем временам башня в мире была смонтирована 250 рабочими в поразительно короткий срок. 16 опор, на которых держится башня (по четыре в каждой из четырех «ног»), были снабжены гидравлическими подъемными устройствами, дабы обеспечить абсолютно точный горизонтальный уровень первой платформы. И хотя нивелировка потребовалась незначительная, без этих домкратов поставить башню не удалось бы никогда.

Башня, возведенная за 26 месяцев, оставалась самым высоким сооружением в мире до 1931 года, когда в Нью-Йорк-сити был построен небоскреб Эмпайр-стейт-билдинг.

Байтерек — монумент в столице Казахстана, Астане,

одна из основных достопримечательностей города (каз. Байтерек — перен. значение «опора, защитник»). Проект разработан по инициативе президента РК Нурсултана Назарбаева известным своими hi-tech сооружениями Норманном Фостером. Структура башни символизирует три основы мироздания – подземный, земной и небесный миры. На глубине четыре с половиной метра находится нижний уровень, где располагаются кафе, аквариумы и мини-галерея «Байтерек». Высота постройки составляет 97 метров, что символизирует 1997 год, год провозглашения новой столицы. Металлическая конструкция башни весит больше 1000 тонн и стоит на 500 сваях. На вершине находится огромный шар из стекла диаметром 22 метра и весом 300 тонн. Общая высота составляет 105 метров.

«Байтерек» своим расположением и композиционным строением выражает космогонические представления древних кочевников, по преданиям которых на стыке миров протекает Мировая река. На её берегу возвышается Дерево жизни — Байтерек (каз. Байтерек - "тополь"), корнями удерживающее землю, а кроной подпирющее небо.



Рисунок 92. Монумент Байтерек. Астана, Казахстан

Корни этого дерева, соответственно, находятся в подземном мире, само дерево, его ствол — земном, а крона — в небесном. Каждый год в кроне Дерева священная птица Самрук откладывает яйцо — Солнце, которое проглатывает дракон Айдахар, живущий у подножия дерева жизни, что символически означает смену лета и зимы, дня и ночи, борьбу Добра и Зла. «Байтерек» означает молодое, крепкое, растущее дерево, символизирует собой государство, сохранившее свои исторические корни, имеющее прочную опору и устремленность к будущему процветанию.

О “London Eye”. Самое большое колесо обозрения в мире находится в Лондоне и название этого колеса – “Глаз Лондона”.



Рисунок 93. Колесо обозрения «Лондонский глаз»

Высота колеса 135 метров или 443 фута и достигает высоты сорока пятиэтажного. 6 лет продолжалось строительство, 31 декабря 1999 года колесо обозрения Лондона было запущено и приняло первых посетителей. Отдаленно колесо обозрения напоминает велосипедное колесо. На нем располагаются 32 кабинки для туристов. В каждой кабинке помещается до 25 человек. Скорость вращения колеса обозрения мала примерно 0.9-1.6 километров в час. Полный оборот происходит за полчаса. На ободе колеса закреплены прозрачные кабины-капсулы вместимостью двадцать пять человек каждая. Их всего тридцать две – по количеству пригородов Лондона. Приводится в движение эта машина с помощью двух небольших двигателей, притом, что вес конструкции составляет 1700 тонн. За полчаса, в течение которого колесо обозрения совершает полный оборот, его посетители могут как на ладони наблюдать виды Лондона и его достопримечательности.

Лондонский глаз излюбленное место влюбленных, а в новогодние и рождественские праздники – площадка для обзора фейерверков.





3

Рисунок 94. Турецкий рисунок XVII века, прообраз современных колёс обозрения (1). Первое колесо Ферриса в Чикаго, 1893(2). Венское колесо обозрения ночью (3)

После закрытия выставки это колесо ещё дважды перенесли на другое место. Колесо было окончательно разобрано в 1904 году после того, как оно год проработало на выставке в Сент-Луисе. Одно из наиболее известных колёс обозрения, построенное по проекту Ферриса вскоре после его смерти, в 1897 году, находится в Вене и сохранилось до сих пор, рис.94. Называется оно *Wiener Riesenrad* и является одной из главных достопримечательностей австрийской столицы. Первое колесо обозрения в Великобритании было построено в Лондоне в 1895 году. Оно было скопировано с колеса Ферриса в Чикаго двумя молодым австралийскими инженерами Адамом Гадделином (англ. Adam Gaddelin) и Гарретом Уотсоном (англ. Gareth Watson), которые впоследствии построили ещё около двухсот колёс обозрения по всему миру. Лондонское же колесо просуществовало с 1895 по 1906 год, успев покатасть за это время 2,5 млн. человек. Находилось оно в районе *Earls Court*.

В Москве сегодня имеется 7 колес обозрения, установленных в различных парках. Самое низкое колесо — 25 м; самое высокое — 73 м. Возраст большинства аттракционов более 10 лет; самое старое — колесо в Измайловском парке, построенное в 1958 году. 30 июня 2012 года в парке культуры и отдыха поселка Лазаревское в Сочи открыли колесо обозрения диаметром 80 м. Колесо изготовлено под руководством конструктора В. Гнездилова, который в 1995 году создал Колесо имени 850-летия Москвы. На нем установлены 14 кабинок вместимостью шесть человек и 14 открытых кабин по четыре человека.

Русский мост — вантовый мост во Владивостоке, соединяющий полуостров Назимова с мысом Новосильского на острове Русском. Имеет самый большой в мире пролёт среди вантовых мостов, длиной 1104 метра, и первые по высоте пилоны — 324 м.

Параметры моста:

- Общий вес главной металлической балки жёсткости руслового пролёта — 23 000 т
- Общая длина моста — 1885,53 м
- Общая протяжённость с эстакадами — 3100 м
- Схема моста: 60+72+3×84+1104+3×84+72+60 м
- Длина центрального руслового пролёта — 1104 м
- Ширина моста — 29,5 м
- Общая ширина проезжей части — 21 м
- Число полос движения — 4 (2 в каждую сторону)
- Подмостовой габарит — 70 м
- Количество пилонов — 2
- Высота пилонов — 324 м
- Самая длинная/короткая ванта — 579,83/135,771 м

Рисунок 95. Для сооружения каждого ростверка пилона понадобилось примерно 20 000 кубометров бетона и около 3000 тонн металлоконструкций



Рисунок 96. Конструкция пролетного строения имеет аэродинамическое сечение для восприятия нагрузок от шквалистого ветра.

9.2. Общие сведения

Железо (Ferrum) – самый распространенный после алюминия металл в природе (4,2% земной коры). Плотность железа 7,87 г/см³, температура плавления 1539⁰С. Технически чистое железо – мягкий пластичный металл, имеет следующие свойства: $\sigma_b=250\text{МПа}$, $\sigma_T=120\text{МПа}$, $\delta=40\%$, HB = 80, E = 210ГПа.

Важной особенностью железа является наличие аллотро-

пических модификаций, отличающихся кристаллическим строением и свойствами: $\alpha\text{Fe}(\text{K8})$ и $\gamma\text{Fe}(\text{K12})$. В свою очередь, αFe имеет собственно ферромагнитное αFe с решеткой K8, параметром решетки 0,29 нм и с температурой областью существования до 768°C; немагнитное $\alpha(\beta)\text{Fe}$ с решеткой K8, параметром решетки 0,28 нм и температурной областью существования 768-911°C, $\alpha(\delta)\text{Fe}$ с решеткой K8 и параметром решетки 0,29 нм с температурной областью существования 1392-1539°C; модификация γFe немагнитная с решеткой K12, параметром решетки 0,36 нм и областью существования 911-1392°C.

Второй особенностью железа является его способность растворять в себе многие элементы. Одним из таких элементов является углерод (C). Углерод – это неметаллический элемент второго периода четвертой группы периодической системы с плотностью 2,5 г/см³ и температурой плавления ~3500°C.

Сплавы системы Fe-C(Fe-Fe₃C) называются железуглеродистыми; они нашли широкое применение в жизни людей. На рис.5.1 показана диаграмма состояния Fe-Fe₃C(Fe-C).

Характеристика фаз и важнейшие структурные составляющие приведены в табл. 17, 18.

Таблица 17

Характеристика фаз системы Fe-Fe₃C (Fe-C)

Название фазы	Тип фазы	Пространственная решетка	Содержание C, %
Феррит	Твердый раствор внедрения C в αFe	Кубическая объемно центрированная(КЦ), K8	До 0,025 при 727°C
Аустенит	Твердый раствор внедрения C в γFe	Кубическая гранецентрированная(КГЦ), K12	До 2,14 при 1147°C
δ -феррит	Твердый раствор внедрения C в δFe	Кубическая объемно центрированная(КЦ), K8	До 0,1 при 1499°C
Цементит	Карбид Fe ₃ C	Орторомбическая РО	6,67
Графит	Углерод	Гексагональная Г (типа алмаза)	100

В настоящее время железуглеродистые сплавы делятся на две большие группы: стали с содержанием углерода до 2,14% и

чугуны с содержанием углерода более 2,14% и имеющие в своей структуре эвтектику.

Таблица 18

Характеристика структурных составляющих системы Fe-Fe₃C (Fe-C)

Наименование	Тип структуры и условия образования
1	2
Ледебурит	Эвтектика, образующаяся при температуре ниже 1147 ⁰ С из жидкого расплава с содержанием 4,3%С и состоящая из аустенита (2,14%С) и цементита дендритной формы. Аустенит (γFe) при охлаждении выделяет вторичный цементит и при температуре 727 ⁰ С превращается в перлит. $Ж_{4,3\%C} \rightleftharpoons \gamma Fe_{2,14\%C} + Fe_3C_{6,67\%C}$
Графитная эвтектика	Эвтектика, образующаяся при температуре 1153 ⁰ С из жидкого расплава с 4,26%С и состоящая из аустенита (2,11%С) и графита $Ж_{4,26\%C} \rightleftharpoons \gamma Fe_{2,11\%C} + \Gamma_{100\%C}$
Перлит	Эвтектоид, образующийся при температуре 727 ⁰ С из аустенита с содержанием 0,8%С и состоящий из феррита (α Fe) и цементита. Соотношения феррита и цементита в перлите находится как 7:1. $\gamma Fe_{0,8\%C} \rightleftharpoons \alpha Fe_{0,025\%C} + Fe_3C_{6,67\%C}$
Перитектика	Образования аустенита по реакции $\delta Fe_{0,1\%C} + Ж_{0,51\%C} \rightleftharpoons \gamma Fe_{0,18\%C}$
Цементит первичный	Избыточная фаза Fe ₃ C, выделяющаяся из расплава с содержанием С > 4,3% при затвердевании от данной температуры до 1147 ⁰ С

Цементитвторичный	Избыточная фаза, выделяющаяся из аустенита от 1147 ⁰ С с содержанием 2,14%С до температуры 727 ⁰ С с содержанием 0,8%С
Цементит третичный	Выделяется из феррита с 0,025%С при охлаждение ниже 727 ⁰ С
Графит	1.Избыточная фаза, выделяющаяся при затвердевании сплавов по стабильной системе Fe-С из расплавов с содержанием С>4,26% 2.Составляющая графитной эвтектики 3.Фаза, выделяющаяся из аустенита как вторичный графит 4.Фаза, выделяющаяся при вторичной графитизации чугунов

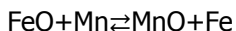
9.3. Сталь

Сталь бывает деформируемая, выпускаемая металлургическими предприятиями, и литейная, производство которой осуществляется в литейных цехах машиностроительных заводов [34]. Литейные стали отличаются от деформируемых большим содержанием вредных (S и P) примесей и, соответственно, более низкими пластичными свойствами.

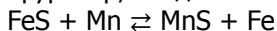
Деформируемая сталь. В настоящее время производится большое количество марок стали различного сортамента. Стали подразделяются на группы по своему химическому составу и по назначению. По химическому составу стали делятся на углеродистые и легированные.

Углеродистые стали – это сплавы железа с углеродом, причем содержание углерода обычно не превышает 1,5%. В углеродистых сталях всегда имеются примеси, которые в процессе производства либо специально вводятся, как, например, раскислители марганец и кремний, либо попадают с исходной рудой, как сера и фосфор.

Марганец в жидкой стали выполняет несколько функций. Как раскислитель, он соединяется с кислородом по реакции



Закись железа FeO в процессе кристаллизации стали располагается в виде мономолекулярной прослойки по границам кристаллитов и значительно снижает механические, особенно пластические свойства. Вторую функцию марганец выполняет как десульфуратор, соединяясь с серой по реакции



Сульфид железа FeS образует с железом Fe легкоплавкую эвтектику ($t_{\text{пл}}=9980\text{C}$), которая располагается по границам зерен и при горячей деформации приводит к красноломкости.

Как легирующий элемент марганец растворяется в феррите, упрочняет его и увеличивает прокаливаемость стали.

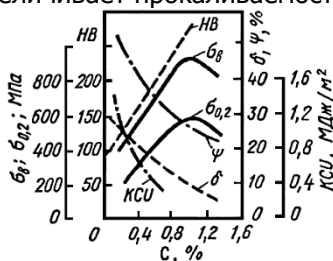
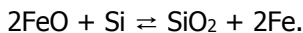


Рисунок 97. Зависимость механических свойств от содержания углерода

Кремний раскисляет сталь по реакции



Фосфор растворяется в феррите, уменьшает его пластичность и повышает температурный порог хладноломкости.

По содержанию углерода стали подразделяются на малоуглеродистые (до 0,25%С), среднеуглеродистые (от 0,25 до 0,50%С) и высокоуглеродистые (от 0,5 до 2,0%С). С повышением содержания углерода в стали повышаются прочностные свойства и твердость и снижаются пластические свойства за счет увеличения в стали перлита и структурно свободного цементита в заэвтектоидной стали, рис. 97.

Классификация углеродистых сталей. Углеродистые стали классифицируют по структуре, способу производства и раскисления, по качеству.

По структуре стали бывают: 1) доэвтектоидные, содержащие до 0,8%С, структура которых состоит из феррита и перлита, количество которого пропорционально содержанию углерода $\Pi =$

($C/0,8$) • 100%, где P – содержание перлита, %; C – содержания углерода в стали; 2) эвтектоидные, содержащие около 0,8% C , структура которых состоит только из перлита; 3) заэвтектоидные, содержащие > 0,8% C , со структурой перлита и различной формы цементита (сетка вокруг зерен перлита или отдельные зерна – глобулы).

По способу производства различают стали, выплавленные в мартеновских печах, в конвертерах и в электропечах.

По способу раскисления стали подразделяют на кипящие кп, раскисленные только Mn , полуспокойные пс, раскисленные Mn и Al и спокойные сп, раскисленные Mn , Si и Al .

По качеству различают стали обыкновенного качества и качественные. Главное отличие этих двух групп сталей – содержание вредных примесей. В сталях обыкновенного качества содержание серы не более 0,05%, а фосфора не более 0,04%. Качественные стали содержат не более 0,04% S и не более 0,035% P .

Сталь обыкновенного качества производят по ГОСТ 380-94 в крупных мартеновских печах и кислородных конвертерах. Их обозначают буквами «Ст», что означает «сталь» и цифрами от 0 до 6, например: Ст0, Ст1,..., Ст 6. В конце обозначения марки ставят буквы кп – кипящая, пс – полуспокойная и сп – спокойная. Химический состав и механические свойства обыкновенных сталей приведены в табл. 19, 20.

Таблица 19

Состав углеродистых сталей обыкновенного качества, % (ГОСТ 380-94)

Марка стали	C	Mn	Si
Ст0	≤0,23	–	–
Ст1кп	0,06-0,12	0,25-0,5	≤0,05
Ст1сп	0,06-0,12	0,25-0,5	0,12-0,3
Ст2кп	0,09-0,15	0,25-0,5	≤0,07
Ст2сп	0,09-0,15	0,25-0,5	0,12-0,3
Ст3кп	0,14-0,22	0,3-0,6	≤0,07
Ст3пс	0,14-0,22	0,4-0,65	0,05-0,17
Ст3сп	0,14-0,22	0,4-0,65	0,12-0,3
Ст4кп	0,18-0,27	0,4-0,7	≤0,07
Ст4сп	0,18-0,27	0,4-0,7	0,12-0,3
Ст5пс	0,28-0,37	0,5-0,8	0,5-0,17
Ст5сп	0,28-0,37	0,5-0,8	0,15-0,35
Ст6пс	0,38-0,49	0,5-0,8	0,05-0,17
Ст6сп	0,38-0,49	0,5-0,8	0,15-0,35

Таблица 20

Механические свойства сталей обыкновенного качества

Марка стали	σ_b , МПа	δ , %
Ст0	не менее 320	22
Ст1кп, Ст1сп	320-400	33
Ст2кп, Ст2сп	340-420	31
Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп	380-470	25-27
Ст4кп, Ст4сп	420-520	23-25
Ст5пс, Ст5сп	500-620	19-21
Ст6пс, Ст6сп	600-720	14-16

Обыкновенная углеродистая сталь выпускается металлургическими заводами после обработке давлением. При этом структура стали делается значительно более однородной, в результате чего ее механические свойства улучшаются. Важнейшим видом обработки является прокатка. Слитки, поступающие в прокатный цех металлургического завода, нагреваются до 1000-1300⁰С. При этом сталь переходит в состояние аустенита, становится очень пластичной. На прокатном стане слитки многократно проходят через вращающиеся валки, обжимаются и превращаются в разнообразную продукцию: листы, трубы, балки, различных сортовой прокат, изделия сложной формы. Горячекатаная сталь–наиболее употребительный материал для различных отраслей промышленности, в том числе в художественном производстве.

Стальной прокат подразделяется на следующие груп-

пы: лист, трубы, сортовой прокат, периодический прокат.

Сортовой прокат различается по размерам: крупный, средний, мелкий и по форме: квадратный, полосовой, трехгранный, шестигранный, круглый, полукруглый, сегментный. Кроме того прокат бывает угловой, швеллерный, тавровый, двутавровый, зетовый, колонный, рельсовый и т.д.

Листовой прокат подразделяется на толстые листы (> 4мм) и тонкие листы. К тонким листам относится кровельная сталь (кровельное железо), листовая декапированная (отожженная и травленая) сталь – наиболее мягкая и более устойчивая против коррозии, белая жечь – тонкие листы мягкой стали, покрытые с обеих сторон слоем олова, черная полированная жечь, оцинкованная жечь и т.п.

Сталь обыкновенного качества применяется для изготовления различных малоответственных изделий, не подвергающихся значительным закономерным нагрузкам,

Качественные углеродистые стали выплавляют в электропечах, кислородных конвертерах и мартеновских печах по ГОСТ 1050-88. Они поставляются по химическому составу и механическим свойствам, табл. 22.

Таблица 22

Состав и свойства некоторых марок качественных углеродистых сталей (ГОСТ 1050-88)

Мар- ка ста- ли	Химический состав, %				Механические свойства, не менее				
	C	Mn	Si	Cr, не более	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_{B} , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
08	0,05-0,12	0,35-0,65	0,17-0,37	0,10	196	320	33	60	-
10	0,07-0,14	0,35-0,65	0,17-0,37	0,15	205	330	31	55	-
15	0,12-0,19	0,35-0,65	0,17-0,37	0,25	225	370	27	55	-
20	0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-0,37	0,25	245	410	25	55	-
25	0,22-0,30	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	275	450	23	50	88
30	0,27-0,35	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	295	490	21	50	78
35	0,32-0,40	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	315	530	20	45	69
40	0,37-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	335	570	19	45	59
45	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	355	600	16	40	49
50	0,47-0,55	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	375	630	14	40	38
55	0,52-0,60	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	380	650	13	35	-
60	0,57-0,65	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	400	680	12	35	-

Примечание: нормы ударной вязкости устанавливаются по-

требителем на термически обработанных (закалка + отпуск) образцах.

Содержание вредных примесей в качественных сталях ограничено пределами: до 0,04% S и до 0,035% P.

При обозначении кипящей и полуспокойной стали в конце марки указывается степень раскисленности: кп, пс. Для спокойной стали степень раскисленности не ставится.

По содержанию углерода качественные углеродистые стали бывают низкоуглеродистыми (до 0,25%С), среднеуглеродистыми (0,30-0,50%С) и высокоуглеродистыми (конструкционные – до 0,65%С). При обозначении высококачественных сталей в конце марки ставят букву А, например, сталь 45А.

Высококачественные углеродистые стали применяются для ответственных высоконагруженных деталей.

Малоуглеродистые высококачественные стали не закаливаются, обладают высокой пластичностью, вязкостью, хорошо штампуются, свариваются. Используются как в исходном состоянии (стойки, корпуса и др.), так и после цементации (поверхностного насыщением углеродом до 0,8-1,2%С) для изготовления, валов, осей, втулок, шпилек и т.п. После цементации сталь подвергают закалке и отпуску в зависимости от требуемых эксплуатационных свойств (низкому до 250°C для получения твердости около 60 HRC и среднему от 250 до 450°C для получения твердости 40-50 HRC).

Сталь для глубокой вытяжки (08кп) имеет пониженное содержание углерода (до 0,008%) и кремния (до 0,03%); марганец 0,25-0,5%, сера и фосфор <0,03% каждого. Данная сталь имеет практически ферритную структуру с небольшими вкраплениями мелких зерен перлита. Выделения третичного цементита по границам зерен не допускаются. Данная сталь обладает высокими пластичными свойствами, и из нее изготавливают кузова автомобилей, тракторов, комбайнов, различные крышки и колпаки для сельскохозяйственных машин.

Сталь для сварных конструкций. Для сварных конструкций применяют углеродистые (Ст3, Ст5пс, 10, 25, 30, 35), низколегированные (15Г, 20Г, 25Г) и легированные стали (09Г2ДТ) стали. Для ответственных узлов нельзя применять кипящую сталь всех марок и полуспокойную сталь Ст5пс. Для упрощенной оценки свариваемости углеродистых сталей с небольшим содержанием

марганца и кремния можно воспользоваться следующей эмпирической зависимостью:

$$C_{\text{эвк}} = C + 0,25Mn + 0,25Si,$$

где $C_{\text{эвк}}$ – условный эквивалент углерода. Стали, имеющие $C_{\text{эвк}} < 0,45$, относятся к хорошо сваривающимся. Для ответственных сварных конструкций применяют стали 09Г2, 10Г2, 15ГС, 20ГС, 25ГС.

Автоматные стали выплавляют по ГОСТ 1414-75. Эти стали применяют для массового изготовления крепежных изделий на станках-автоматах. Основное требование к ним – хорошая обрабатываемость резанием, достигаемая за счет увеличения серы и фосфора до 0,1-0,2%, а также добавления селена и свинца. Маркируются автоматные стали буквой А и двумя цифрами, показывающими среднее содержание углерода в сотых долях процента: А12, А20, А30. При введении свинца в количестве 0,15-0,30% стали маркируются буквами АС и цифрами среднего содержания углерода в сотых долях процента. При дополнительном легировании другими элементами их обозначают так же, как и в обычных конструкционных сталях: АС35Г2, АС35ХГМ и т.д.

Из среднеуглеродистых сталей (35-45) изготавливают средненагруженные детали (рычаги, шатуны, тяги и т.п.), не работающие в условиях износа. Эти стали хорошо принимают закалку и могут быть подвергнуты объемной и поверхностной термической обработке. Поверхностная закалка, как правило, проводится с нагревом ТВЧ с последующим отпуском на твердость 40-50 HRC. Такой термообработке подвергаются звездочки, коленчатые и распределительные валы, зубья шестерней, оси, ролики и др.

Высокоуглеродистые конструкционные стали (например, сталь 65) используются для изготовления пружин, рессор после термообработки (закалка + отпуск) на твердость 40-50 HRC.

Углеродистые инструментальные стали (ГОСТ 1435-99) предназначены для изготовления различного инструмента с высокой твердостью (закалка + низкий отпуск) или изделий с повышенной твердостью и высокими упругими свойствами (закалка + средний отпуск), табл. 23.

Таблица 23

Состав и назначение углеродистых инструментальных сталей
(ГОСТ 1435-99)

Марка стали	Содержание С, %	Назначение
У7	0,65-0,74	Зубила, кузнечные штампы отвертки, клейма по стали, кувалды, слесарные молотки; витые пружины, пружинные фиксаторы, рычаги механизмов
У8	0,75-0,84	Пуансоны, матрицы, керны, резцы для обработки медных сплавов; пружины
У9	0,85-0,94	Дыропробивные штампы, инструмент по дереву; сегменты и вкладыши режущих аппаратов
У10	0,95-1,04	Сверла, метчики, плашки, развертки.
У11, У12	1,05-1,14 1,15-1,24	Сверла, метчики, плашки, калибры, напильники, пилы по металлу
У13	1,25-1,35	Резцы по твердому металлу, шаберы, зубила для насечки напильников, волоочильный инструмент

Основным преимуществом углеродистых инструментальных сталей является невысокая твердость 165-180 НВ исходной структуры (зернистого перлита), хорошая обрабатываемость резанием в отожженном состоянии и высокая твердость (62-64 HRC), прочность и износостойкость.

Легированные стали. По эксплуатационным признакам в зависимости от назначения различают три класса легированных сталей и сплавов:

1. Конструкционные стали и сплавы для изготовления деталей машин; обладают комплексом высоких механических свойств.

2. Инструментальные стали и сплавы для изготовления: а) режущего инструмента; б) штампов; в) измерительного инструмента.

3. Стали с особыми физическими и химическими свойствами.

Маркировка легированных сталей осуществляется по буквенно-цифровой системе. Каждая марка стали содержит сочетания букв и цифр. Легирующие элементы обозначаются следующими буквами русского алфавита: Х – хром, Н – никель, В – вольфрам, М – молибден, Ф – ванадий, Т – титан, Ю – алюминий, Д – медь, Г – марганец, С – кремний, К – кобальт, Ц – цирконий, Р

– бор, Б – ниобий, П – фосфор. Буква А в середине марки показывает содержание азота, а в конце – то, что сталь высококачественная. Первые две цифры показывают содержание углерода в сотых долях процента. Цифры, стоящие за буквами, означают среднее содержание данного легирующего элемента в целых процентах.

При содержании легирующего элемента около одного и менее процента цифра не ставится. Например, сталь 18Х2Н4В в среднем содержит 0,18%С, 2%Cr, 4%Ni и 1%W.

Одна цифра перед маркировкой соответствует содержанию углерода в десятых долях процента. Отсутствие цифр перед маркой стали означает, что содержание углерода в стали составляет в среднем один процент и более (это не относится к коррозионно-стойким и жаропрочным сталям).

Некоторые группы сталей обозначают специальными буквами: А-автоматные стали; Ж-хромистые нержавеющие стали; Я – хромоникелевые нержавеющие стали; Р – быстрорежущие стали; Ш – шарикоподшипниковые стали и т.д. Например, стали Ж1, Я1, Р18, ШХ15.

По специальным системам маркируются электротехнические, строительные, рельсовые и нестандартные легированные стали, жель.

Конструкционные стали. Основными легирующими элементами в конструкционных сталях являются хром до 2%, никель 1-4%, марганец до 2%, кремний 0,6-1,2%. Вспомогательными элементами являются Мо (0,2-0,4%), W (0,5-1,2%), V (0,1-0,3%), Ti (0,1-0,2%), которые обычно вводят в сталь в сочетании с Cr и Ni.

Конструкционные стали в зависимости от целевой работы обладают высокой прочностью при больших статистических нагрузках, пластичностью и вязкостью при динамических воздействиях, достаточной выносливостью при знакопеременных нагрузках, твердостью и износоустойчивостью.

Различают цементуемые (низкоуглеродные) и улучшаемые (среднеуглеродистые) стали.

Цементуемые (низкоуглеродистые) стали. Эти стали характеризуют по свойствам сердцевины после термической обработки, по виду термической обработки (после цементации), а также по свойствам цементированного слоя.

Углеродистая цементуемая сталь 10 слабо прокаливается и имеет низкие свойства сердцевины.

Марганцовистая сталь 15Г, 20Г, 25Г отличается

большой прокаливаемостью, но обладает повышенной склонностью роста зерна при цементации. Из этих марок сталей изготавливаются менее ответственные детали, подвергаемые цементации на глубину 1,2-1,6 мм и подвергаемые термообработке (закалка + низкий отпуск) на твердость 56-62 HRC – кольца, оси, втулки, болты, толкатели, валы-шестеренки.

Хромистая сталь 15X, 20X после термической обработки имеет повышенные механические свойства сердцевины, склонна к росту зерна при цементации и короблению при закалке. Такая сталь применяется для некрупных изделий несложной формы, требующих относительно неглубокой цементации (до 1,5 мм). Из такой стали изготавливают оси, втулки и ролики крупных тяговых втулочно-роликовых цепей, крестовины карданных соединений, валы, шестерни, червяки, закаленные на твердость 56-62 HRC.

Сложнолегированные стали. Введение в хромистую сталь V (15XФ) повышает ее технологические свойства благодаря измельчению зерна, увеличивает вязкость и пластичность сердцевины, но увеличивает склонность к отпускной хрупкости. Марганец в хромистой стали увеличивает прокаливаемость и прочность стали, но также способствуют отпускной хрупкости. Титан придает хромомарганцовистой стали мелкозернистость и вязкость, что позволяет использовать сталь 18ХГТ для ответственных деталей. Высокие механические свойства обеспечивают хромо-никелевые стали 20ХН, 12ХН3А, 12Х2Н4А, 18Х2Р4В, которые используются для сложных и ответственных деталей большого поперечного сечения или для деталей, подвергающихся знакопеременным напряжениям, см. табл. 24.

Улучшаемые стали. Улучшаемыми конструкционными сталями называют среднеуглеродистые стали (0,3-0,5%С), содержащие не более 5% легирующих элементов, используемые после закалки и высокого отпуска при 550-6500С (улучшение). После такой термообработки стали имеют структуру сорбита, хорошо воспринимают ударные нагрузки и обладают высокой прокаливаемостью, прочностью, вязкостью, малой чувствительностью к концентраторам напряжений. В зависимости от степени легированности и прокаливаемости ($D_{9,5} = 95\%$ мартенсита)

Примечание: обычное содержание Si=0,17-0,37%, Mn=0,5-0,8%, S и P<0,035%.

Порог хладноломкости этих сталей определяется температурой, при которой в изломе ударных надрезанных образцов

имеется не менее 50% волокнистой составляющей.

Из улучшаемых конструкционных сталей в сельхозмашиностроении используются 40ХН, 45ХН (пальцы, оси, поводки), 30ХН3А (втулки, фланцы, стаканы), 40НМА (крупногабаритные детали, работающие с динамическими нагрузками), 50ХФА и 60С2Н2А (тяжело нагруженные рессоры и пружины тракторов и комбайнов).

Рессорно-пружинные стали. К рессорно-пружинным сталям предъявляются следующие требования: высокое сопротивление малым пластическим деформациям (высокий предел упругости), высокий предел выносливости и повышенная релаксационная стойкость. Такие свойства обеспечивают стали с содержанием 0,5-0,7% С с трооститной структурой, которая получается после закалки и среднего отпуска при 350-4500С. После термообработки $\sigma_{0,2}$ для углеродистых сталей составляет не менее 800 МПа, а для легированных $\sigma_{0,2} \geq 1000$ МПа. Средние свойства углеродистых рессорно-пружинных сталей после термообработки: $\sigma_{0,2}=800-1000$ МПа, $\sigma_{\text{в}}=1000-1200$ МПа, $\delta=5-8\%$, $\psi=20-35\%$, предел выносливости при изгибающей нагрузке 500-650 МПа, при кручении – 300 МПа. При легировании рессорно-пружинных сталей кремнием и другими элементами прочность возрастает до $\sigma_{0,2}=1100-1600$ МПа, $\sigma_{\text{в}}=1300-1800$ МПа, $\delta=5-8\%$, $\psi=20-35\%$. К рессорно-пружинным относятся следующие марки стали: 65, 70, 65Г, 60С2, 70С3А, 60СГ, 40ХФА (ГОСТ 4959-70). В сельхозмашиностроении наибольшее распространение получила сталь 65Г.

Подшипниковые стали. От подшипниковых сталей, из которых изготавливаются шарики, ролики, кольца подшипников и другие детали (плунжеры, втулки, корпуса распределителей, нагнетательные клапаны), требуется высокая износостойкость и выносливость при контактном циклическом нагружении.

Подшипниковые стали маркируются буквами Ш и Х (шарикоподшипниковая хромистая), после которых ставится цифра, обозначающая содержание хрома в десятых долях. Содержание углерода составляет около 1%.

Для подшипников общего назначения в основном используются марки ШХ15, ШХ15СГ, ШХ4, ШХ20СГ по ГОСТ 801-78, а для работы в агрессивных средах можно рекомендовать марку стали 95Х18-Ш мартенситного класса. Термическая обработка включает закалку с 820-8500С и низкий отпуск 150-1700С и обеспечивает твердость 60-64 HRC.

Износостойкие материалы, стали (ГОСТ 977-88, ГОСТ

21357-87). Износ характеризуется потерей массы детали, уменьшением ее объема или линейных размеров. Если износ относится к пути трения, его называют интенсивностью изнашивания.

Износ, отнесенный ко времени, в течение которого он проявляется, определяется скорости изнашивания. При рассмотрении износостойких сталей (сплавов) следует остановиться на двух примечательных сталях: высокомарганцовистой аустенитной стали (сталь Гатфильда) и графитизированной стали.

Высокомарганцовистые аустенитные стали (110Г13Л, 110Г13Х2БРЛ, 110Г13ХБРЛ, 110Г13ФТЛ, 130Г14ХНФАЛ, 120Г10ФЛ по ГОСТ 997-88, ГОСТ 2157-87) используются в условиях ударно-абразивного изнашивания и повышенного давления. Эти стали, содержащие в среднем 1,2%С и 13%С Mn, после литья состоят из аустенита и избыточных карбидов (FeMn)₃C. После закалки с температуры с 11000С в воде сталь получает чисто аустенитную структуру со следующими механическими свойствами: $\sigma_B=780-980$ МПа, $\sigma_{0,2}=255-390$ МПа, $\delta=40-50\%$, $\psi=40-50\%$, HB=180-220. Целью закалки является растворение карбидов и получение аустенитной структуры. При ударных нагрузках и после деформации в процессе эксплуатации марганцовистый аустенит наклепывается до 50-55 HRC и приобретает хорошую износостойкость. Недостатком данных сталей является плохая обрабатываемость резанием, поэтому детали получают литьем без механической обработки. Из этих сталей изготавливают звенья гусеничных цепей (траков) сельскохозяйственных машин и тракторов, щеки, конуса, билы, бронефутеровочные плиты различных дробилок и мельниц, зубья ковшей экскаваторов и др.

Графитизированная сталь. Эта практически единственная сталь, в структуре которой имеется свободный графит в виде гнезд углерода отжига; она содержит в среднем 1,2-1,6%С и 0,9-1,4%Si, остальные компоненты находятся в пределах, характерных для обыкновенных конструкционных сталей. Эта сталь может использоваться как после горячего деформирования, так и после литья. Поскольку черная металлургия не производит эту сталь, то есть все основания использовать ее в виде отливок. В литом состоянии структура состоит из пластинчатого перлита, избыточных карбидов в виде цементитной сетки и, иногда, гнезд углерода с твердостью ~ 350HB. Для повышения механических свойств и лучшей обрабатываемости резанием ее подвергают графитизирующему отжигу при температуре первой стадии графитизации 900-9500С в течение 4-6 часов. Режим второй стадии графити-

зации может быть различным в зависимости от необходимой структуры: медленное охлаждение в интервале 760-720°C позволяет получать ферритную структуру; более ускоренное – перлитно-ферритную; выдержка в области подкритической температуры 670-690°C приводит к получению зернистого перлита; наряду с различной металлической матрицей в структуре всегда имеются гнезда углерода отжига. Графитизированная сталь хорошо обрабатывается резанием, является хорошим антифрикционным материалом и может быть подвергнута закалке с последующим отпуском для получения требуемой твердости от 30 до 55 HRC. Из графитизированной стали можно изготавливать широкий спектр деталей, вплоть до таких сложных, как гребенки для стригальных машинок, пальцы режущих аппаратов жатки без вкладышей из инструментальных сталей.

Легированные инструментальные стали. Эти стали можно разбить на следующие группы:

1. Низколегированные стали для режущего и измерительного инструмента.
2. Быстрорежущие стали.
3. Штамповые стали.

Низколегированные стали для режущего инструмента (13X, 9XC, XBG и др.) не обладают высокой теплостойкостью и обычно пригодны для работы при температуре 200-250°C, табл. 25. Обычная термообработка легированных сталей состоит из закалки от 830-870°C в масле или ступенчатой закалки и отпуска при температуре 200°C на твердость 61-65 HRC.

Таблица 25

Химический состав некоторых легированных инструментальных сталей, % (ГОСТ 5950-2000)

Марка стали	C	Mn	Si	Cr	W	V
13X	1,25-1,40	0,30-0,60	0,15-0,35	0,40-0,70	-	-
9XC	0,85-0,95	0,30-0,60	1,20-1,60	0,95-1,25	-	-
XBG	0,90-1,05	0,80-1,10	0,15-0,35	0,90-1,20	1,20-1,60	-
XBCГ	0,95-1,05	0,60-0,90	0,65-1,00	0,60-1,10	0,50-1,20	0,15-0,30
9X5BF	0,85-1,00	0,15-0,40	0,15-0,40	4,50-5,50	0,80-1,20	0,15-0,30

Для измерительного инструмента обычно применяют высокоуглеродистые стали У8-У12 и низколегированные стали марок X,

ХГС, ХВГ, 9ХС, содержащие около 1%С и до 1,5%Cr. Их твердость после термообработки 60-64 HRC. Для обеспечения высокой твердости и стабильности размеров высокоточных инструментов применяют закалку в масле, обработку холодом (до - 80 °С) для полного превращения остаточного аустенита и длительное старение при 120-170°С (до 30 ч).

Быстрорежущие стали. Для обеспечения высокой теплоустойчивости (красностойкости) до 600°С режущего инструмента инструментальные стали легируют вольфрамом, табл. 26.

Таблица 26

Химический состав некоторых быстрорежущих сталей, %
(ГОСТ 19265-73)

Марка стали	C	Cr	W	V	Mo	Co
P18	0,73-0,83	3,8-4,4	17,0-18,5	1,0-1,4	до 1,0	до 0,5
P9	0,85-0,95	3,8-4,4	8,5-9,5	2,3-2,7	до 1,0	до 0,5
P6M5	0,82-0,90	3,8-4,4	5,5-6,5	1,7-2,1	4,8-	до 0,5
P6M5Ф	0,95-1,05	3,8-4,3	5,7-6,7	2,3-2,7	5,3	до 0,5
P6M5K5	0,84-0,95	3,8-4,3	5,7-6,7	1,7-2,1	4,8- 5,3 4,8- 5,3	4,7-5,2

После закалки и отпуска быстрорежущая сталь имеет структуру высоколегированного отпущенного мартенсита и карбиды ледобуритного типа с твердостью 63-65 HRC.

Штамповые стали применяют для изготовления штампов холодного и горячего деформирования, пуансонов, матриц, прессформ для литья под давлением. В зависимости от температурных условий эксплуатации различают штамповые стали для холодного и горячего деформирования.

Стали для холодного деформирования делятся на три группы:

1-я группа – для вытяжных и вырубных штампов – это углеродистые У10 – У12 и низколегированные стали Х, ХВГ, ХВСГ, термическая обработка на 60 HRC. К этой группе также относятся высокохромистые стали Х6ВФ, Х12, Х12М, Х12Ф1. Высокую износостойкость этим сталям обеспечивает большое количество карбидов хрома Cr₇C₃; твердость после термообработки 61-63 HRC.

2-я группа – штампы холодного выдавливания – сталь

6Х4М2ФС, которая обеспечивает высокую до 500°C теплостойкость.

3-я группа – холодновысадочные и чеканочные штампы, работающие при высоких ударных нагрузках – сталь 7ХЗ, 6ХЗФС.

Стали для штампов горячего деформирования. Для этих сталей характерна высокая прочность (~ 1000 МПа) и высокая теплостойкость (разгаростойкость).

Для молотовых штампов применяют стали 5ХНМ, 5ХНВ, 5ХНТ, 5ХГМ. После закалки и отпуска при 550°C обладают следующими механическими свойствами: $\sigma_b=1200-1300$ МПа, $\delta=10-12\%$, $KCU=0,4$ МДж/м².

Для крупногабаритных прессовых и молотовых штампов применяют сталь 5Х2НМФС.

Для пресс-форм литья под давлением и прессования цветных металлов и сплавов используют стали 3Х2В8Ф и 3Х2М2Ф.

Стали и сплавы с особыми свойствами. К сталям с особыми свойствами относятся коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные стали и стали и сплавы с особыми свойствами.

Коррозионно-стойкие стали и сплавы. Одним из методов защиты от коррозии является пассивация – это состояние повышенной коррозионной стойкости, вызванное торможением анодных процессов. Это достигается введением в состав стали хрома, вследствие чего образуется прочная оксидная пленка Cr₂O₃ и повышается электродный потенциал с – 0,6В до +0,2В.

Сталь, содержащая 12-14% Cr, устойчива против коррозии в атмосфере, морской воде, ряде кислот, солей щелочей. С повышением содержания хрома коррозионная стойкость стали растет. По структуре хромистые стали бывают ферритные (08Х13: $\sigma_b=400$ МПа, $\delta=20\%$), ферритно-мартенситные (12Х13: $\sigma_b=400$ МПа, $\delta=20\%$), мартенситные (20Х13: $\sigma_b=500$ МПа, $\delta=20\%$). Из ферритных сталей изготавливают оборудование и оснастку предприятий пищевой и легкой промышленности, трубы теплообменной аппаратуры, предметы домашнего обихода. Из мартенситной стали, подвергаемой закалке с 1000°C в масле и низкому отпуску при 200-300°C, изготавливают режущий, измерительный, формовочный инструмент, пружины и другие изделия.

Хромистые стали с содержанием 18%Cr и 9-12%Ni приобретают аустенитную структуру; они имеют более высокую коррозионную стойкость по сравнению с ферритной. В зависимости от содержания углерода сталь может быть аустенитной (Х18Н9Т), аустенитно-мартенситной (2Х17Н2, Х15Н9Ю), аустенитно-

ферритной (0Х22Н5Т). Механические свойства аустенитной стали 04Х18Н10 после закалки от 1100⁰С в воде (для растворения карбидов) без отпуска следующие: $\sigma_b=500$ МПа, $\delta=45\%$. Для устранения межкристаллической коррозии в сталь дополнительного вводят титан, ниобий или тантал, которые связывают углерод, образуя карбид типа TiC, NbC, TaC, предохраняя хром от образования карбидов типа Cr₂₃C₆. Необходимое количество титана определяют по формуле $[\%Ti] = 6/([\%C]-0,02)$, где C – содержание углерода в стали.

Жаростойкие и жаропрочные стали. Способность металла сопротивляться химической коррозии в сухой газовой среде при высоких температурах называется жаростойкостью (окалиностойкостью). Основным легирующим элементом, обеспечивающим жаростойкость стали, является хром; с увеличением содержания хрома жаростойкость повышается. Так, сталь с содержанием 5% Cr (15Х5) сохраняет окалиностойкость до 600⁰С, 9% Cr (40Х9С2) – до 800⁰С, 17% Cr (08Х17Т) – до 900⁰С. Совместное влияния Cr и Ni (20Х23Н18, 20Х25Н20С2) повышает окалиностойкость до 1100⁰С.

Способность металла сопротивляться деформации при высокой температуре называется *жаропрочностью*. Прочность аустенитных хромоникелевых сталей при высоких температурах обеспечивается введением раствороупрочняющих элементов W, Mo, V, Ti, элементов Al, Nb, Ta, В и др., способствующих дисперсионному твердению за счёт образования интерметаллидов Ni₃Ti, Ni₃Al/(09Х14Н16Б, 09Х14Н19В2БР, 45Х14В2М).

К электротехническим сплавам (ГОСТ 21427-87) со специальными свойствами относятся сплавы с высоким электросопротивлением для превращения электрической энергии в тепловую (нагревательные элементы из нихрома, например, Х20Н80, ферронихрома – Х15Н60, фехрала – Х13Ю4, хромаля 0Х23Ю5), с повышенным электросопротивлением для реостатов МНМц-3-12 (манганин), МНМц-40-1,5 (константан), сплавы с неизменным коэффициентом линейного расширения при изменении температуры инвар (основа Fe с 36% Ni), элинвар (основа Fe с 33-35% Ni, 7-9 % Mn и 4% W).

Литейная сталь. Для изготовления стальных фасонных отливок применяют литейные стали, отличительными чертами их являются удовлетворительные литейные свойства: жидкотекучесть, заполняемость, трещиностойчивость и усадочные процессы.

Классификация литейных сталей. Для изготовления

фасонного литья в соответствии с ГОСТ 977-88 применяют три группы литейных сталей: углеродистые (нелегированные), конструкционные легированные и легированные со специальными свойствами.

Маркировка литейных сталей. Литейные стали маркируются той же буквенно-цифровой системой, что и деформируемые, только в конце марки дополнительно ставится буква Л, что означает литейную сталь.

Углеродистые литейные стали. Для получения отливок используются углеродистые стали, содержащие 0,12-0,60%С. Они маркируются числом, обозначающим среднее содержания углерода (в сотых долях процента) и буквой Л. Литейные стали отличаются от деформируемых большим допуском на содержание примесей и несколько пониженной пластичностью.

Все отливки из углеродистых и легированных сталей подразделяются на три группы:

I. Отливки общего назначения, контролируемые по внешнему виду, размерам и химическому составу.

II. Отливки ответственного назначения, контролируемые, кроме того, по прочности (σ_B или σ_T) и относительному удлинению (δ).

III. Отливки особо ответственного назначения, контролируемые дополнительно к указанным характеристикам по ударной вязкости (α_K , возможно, по микроструктуре, пористости, герметичности и др.).

Пример условного обозначения сталей для отливок 23ХГС2МФЛ ГОСТ 977-88 или 23ХГС2МФЛ КТ110 ГОСТ 977-88 при сдаче заказчику. Индекс КТ означает, что сталь поставлена после закалки и отпуска; число 110 показывает требуемый предел текучести.

Содержание углерода и механические свойства литейных углеродистых сталей приведены в табл. 27.

Таблица 27

Механические свойства литейных углеродистых сталей (по ГОСТ 977-88)

Марка сплава	Содержание С, %	Механические свойства, не менее					
		Нормализация + отпуск				Закалка + отпуск	
		σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	KCU, МДж/м ²	σ_B , МПа	δ , %
15Л	0,12-0,20	400	200	24	0,50	-	-
25Л	0,22-0,30	450	240	19	0,40	500	22
30Л	0,27-0,35	480	260	17	0,35	500	17
35Л	0,32-0,40	500	280	15	0,35	550	16
45Л	0,42-0,50	550	320	12	0,30	600	14
55Л	0,52-0,60	600	350	10	0,25	860	13

Примечание: 1) содержание марганца от 0,3 до 0,9 %, и должно быть не менее 1,71S%; 2) содержание кремния от 0,2 до 0,5%; 3) содержание серы от 0,045 до 0,06% и фосфора от 0,04 до 0,08%.

В литом состоянии структура состоит из крупнопластинчатого феррита и перлита (так называемая видманштеттова структура), и сталь обладает низкими механическими свойствами. Исправление структуры достигается термической обработкой: нормализация при температуре 860-900°C и высокий отпуск 620-680°C или (закалка + отпуск). Из литейных углеродистых сталей изготавливают разнообразные детали, не испытывающие значительных знакопеременных нагрузок: кронштейны, головки шарниров, звездочки, различные детали машиностроения.

Легированные конструкционные литейные стали. В эту группу конструкционных литейных сталей входят:

1. Марганцовистые стали (20ГЛ, 30ГЛ и др.) содержат 1-2% Mn и 0,2-0,4%С и относятся к наиболее дешевым легированным сталям; обладают более высокой прочностью и прокаливаемостью; используются для изготовления отливок, работающих в сложных условиях ударного нагружения и изнашивания.

2. Хромистые стали (40ХЛ) имеют высокую прочность и лучшую прокаливаемость и используются для отливок толщиной стенки 60-80 мм; склонны к образованию крупнозернистой структуры; введение 0,25% Мо улучшает структуру и уничтожает отпускную хрупкость.

3. Сталь хромансил (30ХГСЛ) обладает высокой прочностью и прокаливаемостью; используется для

отливок толщиной стенки до 80-100 мм, работающих в условиях износа с ударными нагрузками; обладает хорошей жидкотекучестью, позволяющей получать отливки с толщиной стенки до 4 мм; однако отличается крупнозернистостью, склонностью к трещинам и короблению; для улучшения структуры вводят небольшие добавки молибдена, титана, ванадия.

4. Хромоникелевые стали (40ХНМЛ) обладают наилучшим комплексом механических свойств, сочетающих высокую прочность и вязкость; для уничтожения отпускной хрупкости вводят 0,3% Мо; сталь склонна к образованию горячих трещин и камневидного излома; дорогостоящая.

5. Медистые стали (20ДХЛ, 08ДНФЛ) подвержены дисперсионному твердению, обладают повышенной прочностью и упругостью, равномерностью свойств в толстых и тонких сечениях; используются для ответственных крупногабаритных изделий; обладает хорошей жидкотекучестью и трещиностойкостью.

Механические свойства легированных сталей приведены в табл.5.18.

Таблица 28

Механические свойства литейных легированных сталей (ГОСТ 977-88)

Марка стали	Температура, °С		Механические свойства, не менее			
	закалки	отпуска	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	KCU(a_n), МДж/м ²
20ГЛ	(860)	630	550	300	18	0,5
35ГЛ	(890)	630	550	300	12	0,3
30ГЛ	860	630	600	350	14	0,5
	930	610	650	400	14	0,5
20ФЛ	(890)	630	550	300	18	0,5
45ФЛ	860	630	700	500	12	0,35
40ХЛ	860	630	650	500	12	0,4
35ХМЛ	870	630	700	550	12	0,4
30ХНМЛ	870	630	800	650	10	0,4
30ХГСЛ	875	650	800	600	10	0,4
23ХГС2МФЛ	990	220	1300	1100	6	0,4
20ДХЛ	(880)	580	500	400	12	0,3
08ГДНФЛ	(930)	620	450	350	18	0,5
12ДХН1МФЛ	900	530	1000	750	10	0,3

Примечание: в скобках указана температура нормализации.
Высоколегированные литейные стали со специальными свойствам. Согласно ГОСТ 977-88, высоколегированные стали по структуре подразделяются на шесть классов: 1) мартенситный; 2) мартенситно-ферритный; 3) ферритный; 4) аустенитно-ферритный; 5) аустенитно-мартенситный; 6) аустенитный. На практике чаще всего пользуются классификацией сталей по назначению (основным рабочим свойствам): износостойкая, коррозионно-стойкая, кислотостойкая, жаростойкая и жаропрочная, табл. 29.

Таблица 29

Средний химический состав высоколегированных сталей (ГОСТ 977-88)

Марка стали	Структура	C	Si	Mn	Cr	Ni	Другие элементы
Хромистые коррозионно-стойкие стали							
20X13Л	М	0,2	0,5	0,6	13	-	-
15X25ТЛ	Ф	0,15	0,8	0,6	25	-	0,6Ti
Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали							
10X14НДЛ	М	<0,1	0,3	0,4	14	1,4	1,4Cu
09X16Н4БЛ	М	0,09	0,4	0,4	16	4,0	1,6Nb
Хромоникелевые коррозионно-стойкие и жаростойкие стали							
12X18Н9ТЛ	А	<0,12	0,6	1,5	18	9	0,8Ti
12X18Н12МЗТЛ	А	<0,12	0,6	1,5	18	12	0,8Ti;
18X25Н19СЛ	А	<0,18	1,4	1,1	25	19	3Mo;
40X24Н12СЛ	А-Ф	<0,4	1,0	0,5	24	12	0,4W;
							0,2Mo;
							0,2Ti
							-
Хромоникелевые жаропрочные стали							
15X18Н22В6М2Л	А	0,15	0,4	0,5	18	22	2,5Mo;
08X17Н34В5ТЗЮ2Л	А	<0,08	0,3	0,5	17	34	6W; 0,01B
							5W; 3Ti;
							2Al; 0,05B
Хромокремнистая износостойкая сталь							
40X9С2Л	М	0,4	2,5	0,5	9	-	-
Высокомарганцовистая износостойкая сталь							
110Г13Л	А	1,1	0,7	13	<1,0	-	-

Сталь 20Х13Л после закалки имеет $\sigma_{\text{в}}=630$ МПа, $\sigma_{\text{т}}=450$ МПа и $\delta=15\%$; применяется для литья изделий, подвергающихся ударным нагрузкам (клапанов, лопаток арматуры). Стали 12Х18ТЛ и 15Х25ТЛ имеют $\sigma_{\text{в}}=250-300$ МПа и $\delta=20\%$ и предназначены для изготовления малонагруженных отливок, используемых в агрессивной среде.

Сталь 10Х14НДЛ и сталь 09Х16Н4БЛ имеют $\sigma_{\text{в}}=600$ и 950 МПа соответственно и $\delta=15$ и 18 %, предназначены для отливок в судостроении.

Стали типа 12Х18Н9ТЛ имеют $\sigma_{\text{в}}=450-500$ МПа и $\delta=20-25\%$ и применяются для работы в коррозионной среде.

Сталь 40Х9С2Л обладает повышенной износостойкостью и применяется для нагруженных деталей (клапанов, моторов, крепежных деталей), длительно работающих при температуре до 700 °С.

Сталь 11ОГ13Л, как и ее деформируемый аналог, применяется для работы в условиях тяжелого абразивного износа.

9.4. Чугун

Классификация и характеристика чугуна. Промышленные чугуны, кроме углерода, в качестве одного из основных компонентов содержат также кремний [8]. Поэтому чугун следует рассматривать как многокомпонентный сплав на основе Fe-C-Si (см. рис. 44).

Широкое распространение чугуна обусловлено оптимальным сочетанием различных свойств: технологических (литейных, обрабатываемости резанием), эксплуатационных (механических и специальных) и технико-экономических показателей.

Главной отличительной особенностью структуры чугуна является формирование графитно-аустенитной или цементитно-аустенитной эвтектики (ледебурита). Углерод в чугуне может находиться не только в растворённом состоянии, но в связанном состоянии в виде карбида Fe_3C или свободном состоянии в виде графита.

Форма выделения графита и структура металлической основы определяет основные типы чугуна и их свойства.

Классификация чугуна осуществляется по следующим признакам:

1. по состоянию углерода (свободный и связанный): серый, половинчатый (отбеленный) и белый чугун;
2. по форме включений графита: серый чугун с пластинчатым графитом (СЧ), чугун с вермикулярным (червеобразным) графитом (ЧВГ), высокопрочный чугун с шаровидным графитом (ВЧ), ковкий чугун с хлопьевидным графитом (КЧ);
3. по типу металлической основы (матрицы): ферритный, перлитный, бейнитный, мартенситный и аустенитный чугуны; наиболее часто встречаются чугуны со смешанной структурой: феррито-перлитные и перлито-карбидные;
4. по химическому составу: нелегированные группы (общего назначения) и легированные группы (специального назначения).

Графитизация чугуна. Графитизацией называется процесс выделения графита при кристаллизации или охлаждении сплавов системы Fe – C – Si [36]. Все элементы, находящиеся в составе чугуна, по-разному влияют на процесс графитизации. По степени влияния на графитообразование элементы можно разделить на три группы:

- I – эффективные графитизаторы (Al, C, Si, Ni, P);
- II – элементы двойного действия (Cu, Ti, C, Zr, Mn);
- III – карбидообразующие элементы (Mn, S, Cr, V).

Для отражения влияния углерода, кремния и других элементов на положение состава сплава относительно эвтектической концентрации используется специальная характеристика – степень эвтектичности $S_{\text{э}}$, которая оценивает литейные и механические свойства чугуна.

$$S_{\text{э}} = \frac{C}{4,26 - 0,3Si - 0,33P - 0,4S + 0,03Mn}$$

где C, Si, P, S, Mn, - содержание этих элементов в чугуне, %; 4,26 – концентрация углерода в эвтектической точке C', %.

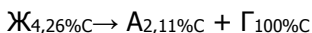
В доэвтектических чугунах $S_{\text{э}}$ изменяется от 0 до 1, в эвтектическом чугуне $S_{\text{э}} = 1$, а заэвтектических чугунах $S_{\text{э}} > 1$.

Аналогичной по физическому смыслу и назначению является другая широко используемая на практике характеристика – углеродный эквивалент $S_{\text{эк}}$.

$$S_{\text{эк}} = C + 0,3Si + 0,33P + 0,4S - 0,03Mn$$

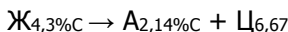
Если значение $S_{\text{эк}} < 4,26$, то чугун является доэвтектическим, при $S_{\text{эк}} > 4,26$ – заэвтектическим.

Формирование первичной структуры. В доэвтектических чугунах формирование первичной структуры начинается с образования первичных дендритов аустенита. При достижении расплавом эвтектической температуры жидкий расплав кристаллизуется в стабильной системе с образованием графитно-аустенитной эвтектики:



Ведущей фазой процесса кристаллизации эвтектики является графит. Он “прорастает” сквозь расплав и образует скелет эвтектической колонии. Между графитными выделениями расплав обедняется углеродом и кристаллизуется в виде аустенита.

При кристаллизации в метастабильной системе первичными выделениями также являются дендриты аустенита, но эвтектика имеет иной фазовый состав и строение – формируется цементито-аустенитная эвтектика (ледебурит):



Ведущей фазой при кристаллизации эвтектики является цементит, он образует матрицу, а эвтектические выделения аустенита имеют стерженьковое строение. Формирование первичной структуры в заэвтектических чугунах при стабильной системе начинается с образования крупных выделений первичного графита. Эвтектика (А + Г) растет в виде колоний сферической формы вокруг первичных выделений графита. При метастабильной кристаллизации чугунов первичные выделения образует цементит; его кристаллы имеют вытянутую призматическую форму. Кристаллизация завершается образованием ледебурита.

Все разновидности структуры обусловлены различной формой и расположением трех фаз: аустенита, графита и цементита.

Формирование вторичной структуры в чугуне происходит вследствие уменьшения содержания углерода в аустените с понижением температуры по линии Е и S (или Е' и S'). В зависимости от содержания кремния в чугуне разность концентраций составляет 0,9–1,2%. Избыток углерода выделяется в виде графита или цементита, которые получили название вторичных. Тип

выделяющейся фазы зависит от условий охлаждения : чем медленнее охлаждение, тем больше вероятность образования графита. Обе вторичные фазы: графит и цементит – обычно не обретают структурной самостоятельности: они объединяются с ранее образовавшимися при кристаллизации соответствующими фазами, как бы нарастают на них.

Эвтектоидное превращение является заключительным этапом формирования вторичной структуры чугунов.

В белых чугунах (закристаллизовавшихся по метастабильной системе) при высоких температурах структура образована двумя фазами: аустенитом и цементитом. При охлаждении цементитная составляющая сохраняется без изменений, а аустенит при эвтектоидной температуре превращается в перлит: $A_{0,8\%C} \rightarrow \Phi_{0,025\%C} + \text{Ц}_{6,67\%C}$. При комнатной температуре структура белого чугуна представляет собой перлитные включения в цементитной матрице.

В серых конструкционных чугунах с содержанием кремния от 1,8 до 2,5% превращение аустенита при медленном охлаждении при температурах от 800 °С происходит по реакции $A \rightarrow \Phi + \Gamma$, а при ускоренном охлаждении – по реакции $A \rightarrow \Phi + \text{Ц}$.

Таким образом, в зависимости от скорости охлаждения в серых чугунах может быть получена перлитная, перлитно-ферритная или ферритная металлическая основа (матрица).

Для приблизительного прогноза структуры и свойств чугуна в зависимости от химического состава (% С и % Si) и толщины стенки предложены структурные диаграммы, рис. 98.

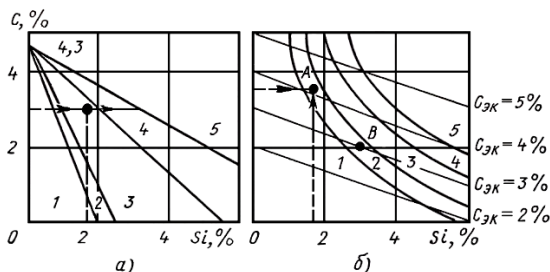


Рисунок 98. Структурные диаграммы Маурера (а) и Н.Г.Гиршовича (б)

Структурная диаграмма Маурера (см.рис. 54,а) является наиболее ранней и простой, но в ней уже нашли отражение основные принципы построения подобных диаграмм, развитые впоследствии в более сложных диаграммах. На диаграмме в координатах

натах C – Si выделены области 1 – 5 существования всех основных типов структуры матрицы чугуна: 1 – (П + Ц); 2 – (П + Ц + Г); 3 – (П + Г); 4 – (П + Ф + Г); 5 – (Ф + Г). Границы этих областей приняты прямыми в соответствии уравнением $C + nSi = 4,3$. Значения коэффициента n характеризуют соотношения графитизирующей способности Si и C для различных типов матрицы чугуна. Для области 1 величина n равна от 1,65 до 2, для области 3 величина n равна 1 для областей 4 – 5 $n = 0,5$.

Структурная диаграмма Н.Г.Гиршовича (см.рис.5.7,6) построена с учётом влияния на графитизацию приведенной толщины стенки отливки R (скорости охлаждения). Для оценки склонности чугуна к графитизации принята гиперболическая зависимость $K_g = C(Si + lgR)$, где K_g принимает следующие значения: для структуры П+Г=4,5–6,0; для структуры П–Ф+Г=10–14; для структуры Ф+Г>14. Так чугун, соответствующий т. А с углеродным эквивалентом $S_{эк} = 4\%$ будет иметь половинчатую структуру П + Ц + Г с грубой формой графита, а чугун т. В с аналогичной структурой за счёт пониженного углеродного эквивалента $S_{эк} = 3\%$ (по диаграмме $C = 2\%$ и $Si = 3\%$) будет иметь мелко пластинчатый графит и повышенные механические свойства.

Серый чугун с пластинчатым графитом. Отливки из серого чугуна (СЧ) с пластинчатым графитом составляют до 80 % общего объёма чугунного литья; это один из наиболее распространенных литейных сплавов. ГОСТ 1412-85 предусматривает следующие марки серого чугуна: СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ30, СЧ35; допускается СЧ18, СЧ21, СЧ24.

Пример обозначения: СЧ15 ГОСТ 1412-85.

Механические и физические свойства, химический состав серого чугуна приведены в табл.30, 31.

Таблица 30

Механические свойства и химический состав (%) серых чугунов (ГОСТ1412-85)

Марка чугуна	σ_B , МПа (кгс/мм ²)	HВ, не более	C	Si	Mn	P	S
						Не более	
СЧ10	100(10)	190	3,5-3,7	2,2-2,6	0,5-0,8	0,3	0,15
СЧ15	150(15)	210	3,5-3,7	2,0-2,4	0,5-0,8	0,2	0,15
СЧ18 ^x	180(18)	229	-	-	-	-	-

СЧ20	200(20)	230	3,3-3,5	1,4-2,4	1,4-2,4	0,2	0,15
СЧ21 ^х	210(21)	241	-	-	-	-	-
СЧ24 ^х	240(24)	241	-	-	-	-	-
СЧ25	250(25)	245	3,2-3,4	1,4-2,2	0,7-1,0	0,2	0,12
СЧ30	300(30)	260	3,0-3,2	1,3-1,9	0,7-1,0	0,2	0,12
СЧ35	350(35)	275	2,9-3,0	1,2-1,5	0,7-1,1	0,2	0,12

Примечание: * - механические свойства приведены по ГОСТ 1412-79 и 1412-76.

Таблица 31

Физические свойства чугуна с пластинчатым графитом (ГОСТ1412-85)

Марка чугуна	Плотность , ρ , кг/м ³	Линейная усадка ϵ , %	Модуль упругости при растяжении $E \cdot 10^{-2}$, МПа	Удельная теплоемкость при t от 20 до 200 °С, Дж/кгК	Коэффициент линейного расширения α , 1/°С	Теплопроводность λ , Вт/мК
СЧ10	$6,8 \cdot 10^3$	1,0	700-1100	460	$8,0 \cdot 10^{-6}$	60
СЧ15	$7,0 \cdot 10^3$	1,1	700-1100	460	$9,0 \cdot 10^{-6}$	59
СЧ20	$7,1 \cdot 10^3$	1,2	850-1100	480	$9,5 \cdot 10^{-6}$	54
СЧ25	$7,2 \cdot 10^3$	1,2	900-1100	500	$10,0 \cdot 10^{-6}$	50
СЧ30	$7,3 \cdot 10^3$	1,3	1200-1450	525	$10,5 \cdot 10^{-6}$	46
СЧ35	$7,4 \cdot 10^3$	1,3	1300-1550	545	$11,0 \cdot 10^{-6}$	42

Наилучшим комплексом механических свойств обладают доэвтектические чугуны (СЧ20-СЧ35), которые нашли наиболее широкое применение для изготовления сложных и ответственных отливок.

Для ориентировочного расчёта механических свойств по степени эвтектичности пользуются эмпирическими формулами:

$$\sigma_B = (102 - 82,5 \cdot S_{\text{э}}) \cdot 10, \text{ МПа}; \quad \text{HB} = 538 - 355 \cdot S_{\text{э}}, \quad \text{или} \\ \text{HB} = 140 + 3,5 \sigma_B.$$

Между пределом прочности при растяжении σ_B , пределом прочности при изгибе σ_B изг и пределом прочности на сжатие $\sigma_{\text{в сж}}$ имеется следующая ориентировочная зависимость:

$\sigma_B = 0,56 \text{в изг.} = 0,256 \text{в сж.}$

Литейные свойства СЧ значительно лучше, чем литейные свойства стали. Хорошая жидкотекучесть чугуна позволяет получать из него фасонные тонкостенные отливки значительных размеров с толщиной стенки до 3–5 мм. При увеличении температуры заливки и степени эвтектичности жидкотекучесть повышается. Особенно сильно повышается жидкотекучесть с увеличением содержания фосфора. Однако при этом возрастает склонность чугуна к трещинообразованию и хладноломкости. Жидкотекучесть $L_{\text{ж}}$ (см) обычно определяется по спиральной пробе в соответствии с ГОСТ 16438-70. Ориентировочно она может быть рассчитана по эмпирической формуле

$$L_{\text{ж}} = 83(C + 0,5P + 0,25Si) + 0,425t_{\text{зал}} - 826,5 \text{ см.}$$

Серый чугун широко используется в различных отраслях промышленности, в частности в автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении: блоки цилиндров, гильзы, поршневые кольца, распределительные валы, толкатели, кронштейны, крышки и др.

Ковкий чугун. Ковким называется чугун с хлопьевидным или компактным графитом, получаемый путем отжига белого чугуна определенного химического состава. ГОСТ 1215-79 (изменен в 1991 г.) устанавливает 11 марок ковкого чугуна (КЧ), табл. 32. Маркировка ковкого чугуна производится буквами КЧ и двумя числами, из которых первое обозначает предел прочности при растяжении σ_B (в кгс/мм²), а второе – относительное удлинение δ (в %). Кроме указанных характеристик ГОСТ регламентирует твердость HB.

Таблица 32

Механические свойства и рекомендуемый химический состав (%)

ковкого чугуна (ГОСТ 1215-79)

Марка чугуна	Механические свойства			Средний химический состав		
	σ_B , МПа (кгс/мм ²)	σ , %	HB	C	Si	Mn
	Не менее					
Ферритные чугуны						

КЧ30-6	294(30)	6	100-163	2,7	1,3	0,5
КЧ33-8	323(33)	8	100-163	2,7	1,3	0,5
КЧ35-10	335(35)	10	100-163	2,6	1,2	0,4
КЧ37-12	362(37)	12	110-163	2,5	1,3	0,3
Перлитные чугуны						
КЧ45-7	441(45)	7	150-207	2,6	1,2	0,6
КЧ50-5	490(50)	5	170-230	2,6	1,2	0,6
КЧ55-4	539(55)	4	192-241	2,6	1,2	0,6
КЧ60-3	588(60)	3	200-269	2,6	1,2	0,6
КЧ65-3	637(65)	3	212-269	2,5	1,3	0,6
КЧ70-2	689(70)	2	241-285	2,5	1,3	0,6
КЧ80-1,5	784(80)	1,5	270-320	2,5	1,3	0,6

Примечание. Содержание примесей: $P \leq (0,10-0,18\%)$; $S \leq (0,06-0,20\%)$; $Cr(0,06-0,08)\%$.

Рекомендуемый химический состав КЧ отличается пониженным содержанием графитизирующих элементов углерода (2,5-2,7%) и кремния (1,1-1,5%) [49]. Это вызвано необходимостью получения в литом состоянии полностью отбеленного чугуна по всему сечению отливки. Если в структуре чугуна образуются включения пластинчатого графита, то при последующем отжиге будет формироваться графит этого типа, а не хлопьевидный, в результате чего вместо КЧ получим СЧ. Содержание примесей допускается в КЧ приблизительно в тех же пределах, что и в сером чугуне: 0,06-0,20% S и 0,10-0,18%P. Дополнительно ограничивается содержание хрома до 0,07%, который тормозит процесс графитизации при отжиге [48].

По уровню свойств КЧ занимает промежуточное положение между СЧ и сталью. При этом он выгодно отличается от стали лучшими литейными свойствами, а от серого чугуна – более высокой вязкостью и пластичностью.

Термическая обработка – отжиг – является обязательной операцией технологического процесса получения отливок из КЧ. Основная цель отжига – обеспечить графитизацию. Режим отжига белого чугуна на ковкий состоит из двух стадий, рис.99.

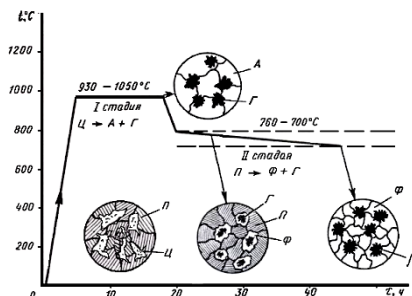


Рисунок 99. Схема графитизирующего отжига ковкого чугуна

Первая стадия включает нагрев до 950-1050°C и выдержку в течение ~ 10 ч. При первой стадии происходит разложение цементита ледебурита по схеме $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{лед}} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{Г}_{\text{отж}}$, в результате чего образуется аустенитная матрица с включениями хлопьевидного (компактного) графита. Затем температура снижается до $\sim 760^\circ\text{C}$, т.е. до температуры несколько выше начала эвтектидного превращения, и далее следует вторая стадия графитизации – медленные охлаждения со скоростью не более $5^\circ\text{C}/\text{ч}$ до температуры $\sim 700^\circ\text{C}$. Во второй стадии возможны два варианта графитизации: 1 – аустенит разлагается на феррит и графит: $\text{А} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}_{\text{отж}}$ и 2 – аустенит превращается в перлит и цементит перлита разлагается на феррит и графит: $\text{Ц} \rightarrow \text{Ф} + \text{Г}_{\text{отж}}$.

Вторая стадия может завершаться полностью с получением ферритного ковкого чугуна или прерываться и ускоренно охлаждаться с получением перлитного или перлитно-ферритного чугуна. Процесс второй стадии графитизации может полностью не осуществляться, если в жидкий расплав ввести 0,10-0,12% Sb или повысить содержание марганца до 1,2-1,6% или снизить соотношение Mn/S до 1,5-2. Эта операция может быть полезной при одновременном получении ферритного и перлитного ковкого чугуна.

Длительность отжига в зависимости от конструкции печи может составлять от 30 до 60 ч., что является серьезным недостатком технологического процесса получения ковкого чугуна.

Для увеличения числа центров графитизации, ускорения диффузии углерода и сокращения цикла отжига применяют модифицирование 0,01% Al и 0,009% B [48]. Число центров графитизации увеличивается с 15-25 до 80-120; для подавления выделения пластинчатого графита жидкий чугун модифицируют

0,0095% Вi. Структура ковкого чугуна состоит из ферритной, перлитно-ферритной или перлитной металлической матрицы и хлопьевидных (компактных) гнезд углерода отжига. Отливки из ковкого чугуна применяются в условиях динамических знакопеременных нагрузок, деталей приводных механизмов, коробок передач, корпусного литья, деталей шасси, коллекторов, рычагов, фитингов и т.д.

Высокопрочный чугун. Высокопрочным называется чугун с шаровидной формой графита. Матрица может быть ферритной, ферритно-перлитной и перлитной. ГОСТ 7293-85 устанавливает восемь марок высокопрочного чугуна и регламентирует их прочность (σ_B и $\sigma_{0,2}$), пластичность (δ) и твердость (HB), табл. 33.

Таблица 33

Механические свойства некоторых высокопрочных чугунов и рекомендуемый химический состав (ГОСТ 7293-85)

Марка чугуна	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Твердость, НВ	Химический состав, %		
	Не менее				С	Si	Mn
ВЧ35	350	220	22	140-170	2,7–3,6	1,3–2,4	0,3–0,6
ВЧ40	400	250	15	140-202	2,7–3,6	1,3–2,4	0,3–0,6
ВЧ45	450	310	10	140-225	2,7–3,6	1,1–2,2	0,4–0,7
ВЧ50	500	320	7	153-245	2,7–3,6	1,1–2,2	0,4–0,7
ВЧ60	600	370	3	192-277	2,7–3,6	2,2–2,5	0,4–0,7
ВЧ70	700	420	2	228-302	2,7–3,6	2,2–2,5	0,4–0,7
ВЧ80	800	480	2	248-351	3,2–3,6	2,6–2,9	0,4–0,7
ВЧ100	1000	700	2	270-360	3,2–3,6	3,0–3,4	0,4–0,7

Примечание. Содержание примесей: $P \leq 0,1$ и $S \leq 0,02$ %.

Маркируется высокопрочный чугун буквами ВЧ и цифрами, характеризующими величину временного сопротивления, например, ВЧ35.

Шаровидную форму графита получают путем введения в жидкий чугун модификаторов, сфероидизирующих графит: Mg, Ce, Y, Ca, Li, Na, La и др.

Введение магния в расплавленный чугун сопровождается значительным пироэффектом - интенсивным его выкипанием и

возгоранием (с выделением большого количества дыма и ослепительной вспышки). Модифицирование лигатурами, содержащими Се и У (ФМЦ, СЦЕМИШ, СИИМИШ), не вызывают пироэффекта.

Магний обычно вводят в автоклавах. Действие магния объясняется увеличением поверхностного натяжения на гранях графита и выравниванием роста графита во всех направлениях.

Высокопрочный чугун с шаровидным графитом, обладающий хорошим сочетанием высоких механических, эксплуатационных и технологических свойств, находит широкое применение в различных областях промышленности для большей номенклатуры ответственных деталей, работающих в условиях высоких статических, ударных и циклических нагрузок - коленчатых валов, зубчатых венцов шестерен, корпусов, барабанов, шкивов, рычагов управления и др. [31].

ГОСТом 28394-89 предусматриваются отливки из чугуна с вермикулярным (червеобразным) графитом, которые обозначаются как ЧВГ30, ЧВГ35, ЧВГ40 и ЧВГ45. В отличие от ВЧ в данном чугуне допускается не более 40% графита шаровидной формы. Вермикулярную форму графита можно получать как и обычным методом модифицирования ЧШГ, так и только церием или СаВа модификаторами, [6]. ЧВГ обладает рядом экономических, технологических и эксплуатационных преимуществ по сравнению с другими литейными сплавами на основе железа. По себестоимости они незначительно превышают отливки из СЧ и, практически, находятся на уровне ЧШГ. Из ЧВГ можно получать сложные тонкостенные отливки без усадочных раковин с высокой размерной точностью. Технология производства ЧВГ значительно проще, чем ЧШГ, а свойства чугуна достаточно высокие. Указанный ГОСТ 28394-89 рекомендует области применения чугуна с вермикулярным графитом: для деталей общего машиностроения, работающих при повышенных циклических механических нагрузках, для деталей двигателей внутреннего сгорания, работающих при переменных повышенных температурах и механических нагрузках, для деталей, работающих при значительных механических нагрузках, в условиях трения, износа, гравитации и при повышенных термоциклических нагрузках. Результаты наших исследований производства чугуна с вермикулярным графитом различными методами показали, что можно получать очень высокие механические свойства ($\sigma_B = 650 - 700$ МПа, $\delta = 2\%$, $HB = 190-250$) в литом состоянии без термической обработки. Высокопроч-

ный чугун с вермикулярным графитом должен найти широкое применение в сельскохозяйственном машиностроении.

Интерес к аусферритному (бейнитному) чугуну остается достаточно высоким, однако оснаждающих производственных результатов пока явно не хватает. Объясняется это с одной стороны достаточно сложной технологией его производства, а с другой - недостатком информации и интереса у проектирующих организаций к этому уникальному по своим свойствам материалу. Напомним, что высокие механические свойства ($\sigma_b = 1000$ и более МПа, δ от 2 до 7 %, HB = 320-348, КС = 0,2 – 0,4 МДж) объясняется уникальной структурой чугуна. Структура правильно обработанного аустенитно-бейнитного чугуна представляет собой сочетание бейнитного феррита и больших объемов (до 45%) - стабилизированного аустенита. Мелкозернистость структуры обеспечивает высокую прочность материала, высокая пластичность ферритной и аустенитной фаз обеспечивают отличную вязкость. Наряду с механическими и эксплуатационными свойствами, аусферритные чугуны обладают традиционными для чугунов отличными литейными свойствами, хорошими демпфирующими свойствами, хорошей прирабатываемостью, отличными антифрикционными свойствами. Для получения приведенных выше свойств аусферритные чугуны должны обладать стабильными свойствами ЧШГ марок ВЧ40-ВЧ50 с однородной литой структурой и быть подвергнуты изотермической обработке по режиму: $T_{\text{ауст.}} = 870-950^\circ\text{C}$, с выдержкой до полной аустенизации (от 2 до 4-х часов) и закалкой в изотермической соляной ванне при $T_{\text{изот.}} = 300-350^\circ\text{C}$, с выдержкой от 0,5 до 2-х часов в зависимости от толщины стенки. Для увеличения прокаливаемости аусферритный чугун легируется Cr, Ni, Cu в соответствии с рекомендациями ГОСТа 7293-85. Изотермической закалке могут подвергаться как отливки, так и механически обработанные детали. Нагретые под аустенизацию детали перед изотермической закалкой могут подвергаться пластической калибровке и после закалки иметь высокую размерную точность.

ГЛАВА 10. ЛЕГКИЕ СПЛАВЫ

10.1. Алюминий и его сплавы

Общие сведения. Алюминий - легкий металл серебристого цвета с плотностью $\rho=2,71$ г/см³ и температурой плавления 6600С, кристаллизуется в кубической гранецентрированной решетке K12 с периодом 0,4041 нм, не имеет полиморфных превращений. Удельная теплоемкость [0,90 кДж/кг·К] и скрытая теплота плавление (405 Дж/г) весьма значительны, поэтому для нагрева и расплавления требуются затраты большого количества тепла.

Он имеет высокую теплопроводность и электропроводность. Электропроводность алюминия высокой чистоты составляет 65,5% от электропроводности меди. Алюминий обладает низкой прочностью ($\sigma_B=100$ МПа) и высокой пластичностью ($\delta=35\%$).

Алюминий – химически активный металл, активно и легко покрывается с поверхности оксидной пленкой Al_2O_3 , которая защищает его от дальнейшего взаимодействия с окружающей средой.

Минеральные кислоты действуют на алюминий, причем с повышением температуры действие усиливается. Некоторые разбавленные кислоты (HNO_3) взаимодействуют с алюминием сильнее, чем концентрированные. Соляная кислота быстро растворяет алюминий. Алюминий устойчив во многих органических кислотах: уксусной, масляной, лимонной, винной, протеиновой, яблочной, глюконовой. В щавелевой и муравьиной кислотах коррозионная стойкость алюминия мала. Алюминий быстро растворяется в растворах едких щелочей.

Алюминий устойчив в тех средах, которые не разрушают защитную оксидную пленку. Так, соли не действуют на алюминий; сернистый газ, аммиак, сероводород, содержащиеся в атмосфере промышленных районов, мало влияют на стойкость алюминия на воздухе. Алюминий обладает высокой стойкостью в морской воде. Скорость коррозии алюминия резко возрастает в присутствии в воде примесей щелочей, солей ртути, меди, ионов хлора.

Первичный алюминий в соответствии с ГОСТ 11069–2001 подразделяется на алюминий высокой и технической чистоты, табл. 34.

Таблица 34

Марки и химический состав первичного алюминия
(ГОСТ 11069–2001)

Чистота	Марка	Массовые доли элементов, %
---------	-------	----------------------------

		Al (не менее)	Fe	Si	Всего приме сей
Высокая	A 995	99,995	0,0015	0,0015	0,005
	A 99	99,99	0,003	0,003	0,01
	A 98	99,98	0,006	0,006	0,02
	A 97	99,97	0,015	0,015	0,03
	A 95	99,95	0,025	0,020	0,05
Техническая	A 85	99,85	0,08	0,06	0,15
	A 8	99,80	0,12	0,10	0,20
	A 7	99,70	0,16	0,15	0,30
	A 7E	99,70	0,20	0,08	0,30
	A 7Э	99,70	0,20	0,10	0,30
	A 6	99,60	0,25	0,18	0,40
	A 5E	99,50	0,35	0,10	0,50
	A 5	99,50	0,30	0,25	0,50
	A 35	99,35	Si +Fe	0,65	0,75
	A 0	99,00	Si +Fe	0,95	1,00

Заводы по производству алюминия выплавляют алюминий в электрогидролизных ваннах, рис. 100 и выпускают виде чушек массой 20 и 1000 кг, а также в виде крупных слитков для прессования и плоских слитков для листовой прокатки, рис. 101.

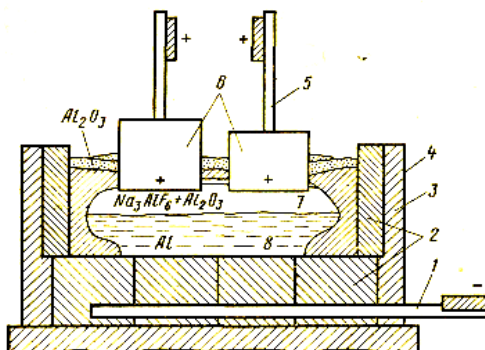


Рисунок 100. Схема электролизной ванны для получения алюминия: 1 — катодные шины; 2 — угольные плиты; 3 — футеровка; 4 — кожух; 5 — анодные стержни; 6 — угольные блоки; 7 — шихта; 8 — дно ванны



Рисунок 101. В литейном цехе Хакасского алюминиевого завода

Из технического алюминия изготавливают листы, проволоку, прутки. Основная продукция – листы, они составляют около 60% всей листовой продукции, выпускаемой металлургическими заводами по обработке алюминиевых сплавов. Марки деформированного алюминия и свойства листов приведены в табл. 35.

Таблица 35

Механические свойства листов из чистого алюминия марок АД00, АД0, АД, АД1

Состояние листа	Толщина листа, мм	σВ, МПа	δ, %
		Не менее	
Отожжённое	1...10	60	28
Нагартованное	4...10	130	5
Горячекатаное	5...10,5	70	15

Классификация алюминиевых сплавов. В зависимости от способа получения полуфабрикатов и изделий алюминиевые сплавы делятся на деформируемые и литейные.

Из деформируемых алюминиевых сплавов получают полуфабрикаты и изделия методами обработки металлов давлением (ОМД) – прокаткой, прессованием, ковкой, штамповкой и т.д.

Литейные сплавы предназначены для фасонного литья.

Помимо этого, методом порошковой металлургии изготавливают спеченные алюминиевые порошки (САПы) и спеченные алюминиевые сплавы (САСы). Заготовки, полученные методами порошковой металлургии, затем подвергают обработке давлением, поэтому порошковые алюминиевые сплавы следует рассматривать как разновидность деформируемых.

Деформируемые и литейные сплавы можно разделить на термически упрочняемые и термически не упрочняемые.

Все применяемые в промышленности сплавы можно также разбить по системам, в которых основные легирующие компоненты будут определять типичные для данной системы физико-механические и химические свойства.

Долгое время в маркировке алюминиевых сплавов не было единой системы. Разные организации, присваивая буквенно-цифровые марки сплавам, руководствовались разными принципами. Есть марки, которые характеризуют состав сплава: АМгЗ (Al–Mg около 3%), АМц (Al–Mn около 1%). Другие марки отражают технологию получения изделий: АЛ2, АЛ5, АЛ32, где буквы АЛ показывают, что сплав литейный, цифры после букв – порядковые номера сплавов, не несущих никакой полезной информации о сплаве; АК4, АК6, АК8 – алюминиевые сплавы дляковки. В марках многих сплавов отражена организация – разработчик: ВАЛ1, ВАЛ12 – литейные сплавы, разработанные в ВИАМе, ВАД1 – деформируемый сплав, разработанный в ВИАМе, В95(В – ВИАМ, 95-завод 95).

В 70-х годах прошлого столетия была предпринята попытка в министерстве авиационной промышленности ввести единую цифровую систему маркировки алюминиевых сплавов, которая могла быть распространена и на другие сплавы. В соответствии с этой системой первая цифра показывает основу сплава (для алюминия – 1), вторая цифра обозначает систему легирования (показывает основные легирующие компоненты), третья и четвертая цифра – порядковый номер сплава, при этом для деформируемых сплавов последняя цифра должна быть 0 или нечетное число, для литейных сплавов – четное число. Таким образом, главная информация о составе сплава определяется второй цифрой марки. Для цифр, стоящих на втором месте, приняты следующие обозначения:

0 – легирующих элементов нет, есть только примеси, т.е. разные сорта алюминия; 1 – сплавы системы Al–Cu–Mg, в которых основными легирующими элементами являются Cu и Mg (сплав 1163); 2 – сплавы системы Al–Cu–Mn (сплав 1201); 3 – сплавы системы Al–Mg–Si и Al–Mg–Si–Cu; 4 – сплавы, легированные Li, а также малорастворимыми в алюминии компонентами: Mn, Cr, Zr и др. (сплав 1420); 5 – сплавы системы Al–Mg (сплав 01570); 9 – сплавы системы Al–Zn–Mg и Al–Zn–Mg–Cu (сплав 1915). Цифры 6, 7, 8 (на втором месте) для маркировки алюминиевых сплавов пока не используются. Данная цифровая мар-

кировка не получила распространения в производственной практике. Для литейных сплавов цифровая маркировка вообще не нашла применения.

Для литейных алюминиевых сплавов ГОСТ 1583–89 введена единая система буквенно-цифровой маркировки, аналогичная, применяемой для стали: первая буква А показывает Al, последующие буквы – основные легирующие компоненты (К – кремний, М – медь, Mg – магний, Mn – марганец, Ni – никель, Zn – цинк), числа стоящие после букв показывают среднее содержание данного компонента (в % по массе); если содержание компонента меньше единицы, буква, обозначающая данный компонент в марке, как правило (за редким исключением), не указывается. ГОСТ 1583–89 (1583–93) предусматривает обозначение сплавов буквенно-цифровой маркой с указанием в скобках старой марки.

Буквы ч (чистый) или оч (особой чистоты) как для деформированных, так и для литейных сплавов указывают на повышенную чистоту сплавов по примесям железа и кремния (например, сплав АК12М2Mn (АЛ25) содержит 11-13%Si; 1,5-3,0%Cu; 0,8-1,9%Mg; 0,8-1,3%Ni; 0,4-0,6%Mn; 0,05-0,2%Ti; сплав АК9ч (АЛ4) – 8,9-10,5%Si; 0,17-0,3%Mg, 0,2-0,35%Mn, Al - остальное).

Деформируемые алюминиевые сплавы. Деформируемые сплавы поддаются обработке давлением, подразделяются на:

- сплавы, не упрочняемые термической обработкой (с концентрацией легирующего элемента не более предела насыщения при нормальной температуре);

- сплавы, упрочняемые термической обработкой (с концентрацией соответственно более предела насыщения при нормальной температуре, рис.56).

К сплавам, не упрочняемым термической обработкой, относятся сплавы систем Al–Mn и Al–Mg. Упрочнение сплавов достигается в результате образования твердого раствора и в меньшей степени – за счет избыточных фаз. Марганец улучшает прочностные и антикоррозионные свойства сплавов. Сплав AlMn представляет твердый раствор марганца в алюминии, в котором также имеются в небольшом количестве частицы $MnAl_6$. Растворимость марганца в точке S_p составляет 1,8% по массе.

Сплавы типа AlMg в равновесном состоянии после охлаждения двухфазные $\alpha + \beta$ (Mg_2Al_3), рис. 102.

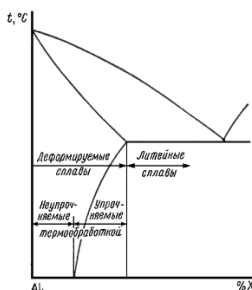


Рисунок 102. Типовая диаграмма состояния A/X, где X – легирующий элемент

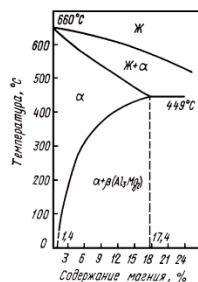


Рисунок 103. Диаграмма состояния A/Mg

Растворимость магния в алюминии в точке Ср составляет 17,4 массовых процента, рис. 103. При охлаждении выделяется соединение Mg_2Al_3 . Магний, как и марганец, повышает прочностные и антикоррозионные свойства. Несмотря на выделение дисперсных частиц в сплавах систем A/Mn и A/Mg, упрочнение сплавов достигается не за счет этих частиц ($MnAl_6$, Mg_2Al_3), а за счет растворного механизма; объемный фактор способствует этому (атомный радиус $r_{Al}=0,125$ нм; $r_{Mg}=0,1594$ нм; $r_{Mn}=0,112$ нм).

Химический состав и свойства сплавов, не упрочняемых термообработкой, приведены в табл. 36.

Таблица 36

Химический состав, механические свойства неупрочняемых алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784–97)

Марка сплава	Химический состав, (Al-основа), %			σв, МПа	δ, %	НВ	Состояние сплава
	Mg	Mn	Прочие элементы				
АМц	—	1,0-1,5	0,1Cu; 0,1Zn; 0,7Fe; 0,6 Si; 0,05-0,2 Cu	130 170 220	20 10 5	30 40 55	М П Н
АМг1	0,5-1,7	—	0,3 Si; 0,7Fe; 0,2Cu; 0,2Mn	190	525	45	М

AMr2	1,7- 2,4	0,1- 0,5	0,4 Si; 0,5Fe; 0,15Cu; 0,15 Zn	— 190 250	— 23 6	— 45 60	— М Н
AMr3	3,2- 3,8	0,3- 0,6	0,5-0,8Si, 0,5Fe; 0,1Cu	200 240	15 7 7	50	М П
AMr5	4,8- 5,8	0,3- 0,8	0,02-0,1 Ti; 0,0002- 0,005 Be; 0,5 Si; 0,5Fe	340	20	65	М
AMr6	5,8- 6,8	0,5- 0,8	0,02-0,10 Ti; 0,0002- 0,005 Be; 0,4 Si; 0,4Fe	350 390 430	20 10 8 8	80 — —	М Н НПП

Примечание: М – мягкий (отожженный), П– полунагартованный, Н- нагартованный.

Эти сплавы хорошо обрабатываются давлением и свариваются. Из них обычно изготавливают изделия, получаемые глубокой вытяжкой из листового материала. Благодаря меньшей плотности и достаточной прочности чаще применяют алюминиево-магниево-медные сплавы (сварные конструкции, емкости для жидкостей, заклепки, электропровода и др.).

К сплавам, упрочняемым термообработкой, относятся сплавы системы $Al-Cu$, $Al-Cu-Mn$, $Al-Cu-Mg$; их называют дуралюминами. Кремний и железо в них являются неизбежными примесями. Марганец вводится для повышения антикоррозионности и прочности (1201). Магний и медь в дуралюминах образуют с алюминием упрочняющие фазы θ (Al_2Cu), S (Al_2CuMg), являются главными легирующими компонентами, определяющими свойства сплавов, табл. 37.

Таблица 37

Химический состав и свойства некоторых упрочняемых термической обработкой алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784–97)

Марка сплава	Химический состав (А/-основа), %				σ_B , МПа	$\delta\delta$, %	НВ	Состояние сплава
	Cu	Mg	Mn	прочие элементы				
Д1	3,5-4,5	0,4-0,8	0,4-0,8	0,2-0,8Si; 0,7Fe	210 420	8 5	45 113	М Т
Д16	8-4,9	2-1,8	3-0,9	0,5Si; 0,5Fe	80 40		2 05	М Т
Д18	2-3,0	2-0,5	2	0,8 Si; 0,7Fe	00		0	Т
Д19	8-4,3	7-2,3	5-1,0	0,000 2-0,005Be	35	0		Т
ВД17	4-2,0	8-2,8	2-0,6	0,01-0,25Cr; 5,0-7,0Zn	40	0		Т

Примечание. Термообработка (Т): закалка + старение.

Все дуралюмины, применяющиеся в настоящее время в промышленности, можно разделить на четыре группы:

1) классический дуралюмин (Д1), разработанный в 1906 году немецким исследователем А.Вильямом;

2) дуралюмин повышенной прочности (Д16), отличающийся от Д1 более высоким содержанием Mg;

3) дуралюмины повышенной жаропрочности (Д19, ВД17), главным отличием которых от Д1 является увеличенное отношение Mg/Cu;

4) дуралюмины повышенной пластичности (Д18), отличающиеся от Д1 пониженным содержанием всех или некоторых компонентов.

Все дуралюмины отличаются пониженной коррозионной стойкостью и нуждаются в специальных средствах защиты от коррозии. Наибольшее распространение в промышленности получили два способа: плакировка (покрытие) дуралюмина техническим алюминием (А7, А8) и электролитическое оксидирование, которое

обычно называют анодированием (получение плотной плёнки Al_2O_3).

Дуралюмины применяются во многих отраслях промышленности: в самолетостроении; машиностроении для кузовов автомобилей, конструкциях средней и повышенной прочности, требующих повышенной долговечности при переменных нагрузках; пищевой и холодильной промышленности для изготовления емкостей, тестомесильных аппаратов, сепараторов, поплавковых камер, арматуры, трубопроводов и т.д.; для строительных конструкций и др.

Алюминиевые ковочные сплавы базируются на системах $Al-Mg-Si$ (сплавы АВ, АД31, АД33, АД35), $Al-Mg-Si-Cu$ (АК6, АК8), $Al-Cu-Mg$ (АК4, АК4-1), $Al-Cu-Mn$ (1201), $Al-Zn-Mg$ (1915) и $Al-Zn-Mg-Cu$ (В95).

Химический состав и механические свойства некоторых ковочных сплавов приведены в табл. 38.

Таблица 38

Химический состав и механические свойства некоторых ковочных сплавов (ГОСТ4784-97)

Марка сплава	Химический состав (Al-основа), %				б _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	Состояние сплава
	Cu	Mg	Si	Прочие элементы				
АВ	0,1-0,5	0,45-0,9	0,5-1,2	0,20Zn	180	250	30	М
Д31		0,45-0,9	0,3-0,7	0,1Zn;	330	250	14	Т
АД33	0,10	0,9	0,7	0,1Ti;	240	190	12	Т
АД35	0,15-0,4	0,8-1,2	0,4-0,8	0,05	340	280	11	Т
	0,10	0,6-1,2	0,7-1,3	0,35Cr	360	290	11	Т
				0,4-1,0Mn				
АК6	1,8-2,6	0,4-0,8	0,7-1,2	0,4-0,8Mn	400	290	12	Т
АК8	3,9-5,0	0,2-0,8	0,6-1,2	0,4-1,0Mn	480	380	9	Т

AK4	1,9-2,5	1,4-1,8	0,5-1,2	0,8-1,3Fe; 0,8-1,3Ni	440	360	10	T
AK4-1	1,9-2,7	1,2-1,8	0,35	0,02-0,10Ti	420	350	12	T
1201	5,8-6,8	0,02	0,2-0,4	0,02-0,1 Ti 0,1-0,25Zr 0,05-0,15V	430	300	13	T
1915	—	1,0-1,8	0,2-0,7	4,0-5,0Zn 0,08-0,20Zr 0,06-0,2Cr	380	320	11	T
B93пч	0,8-1,2	1,6-2,2	0,1	6,5-7,3 Zn 0,2-0,4Fe	520	450	15	T
B95	1,4-2,0	1,8-2,8	0,5	5,0-7,0 Zn 0,1-0,25Cr	250 540	200 470	13 10	M T

Дуралюмины, и в особенности сплавы типа Д16, 1163, американский 2024, обладают многими хорошими качествами, однако их прочность находится на среднем уровне. Между тем для авиационной техники требовались высокопрочные алюминиевые сплавы.

Немного истории. Развитие этих сплавов началось с открытия в 1923–1926 гг. немецкими учеными Зандером и Майером высоких эффектов упрочнения при термической обработке тройных сплавов Al-Zn-Mg. В системе Al-Zn-Mg можно получить максимальную прочность алюминиевых сплавов до 800 или даже 850 МПа, что соответствует прочности среднелегированной стали. Однако освоение высокопрочных сплавов тройной системы Al-Zn-Mg оказалось исключительно сложным делом и сопровождалось драматическими событиями. В 30-х годах в Германии (Гюртлер) и СССР (П.Я. Сальдау) изготовили опытные промышленные партии листов сплава ЦМ. Сплав Сальдау содержал 5,6% Zn и 5,4% Mg и имел прочность 500–600 МПа. Но в СССР и Германии листы постигла одна и та же участь — они растрескались еще до того, как были запущены в работу. В четвертной системе фазами упрочнителями являются интерметаллические соединения $M(MgZn_2)$,

$T(Al_2Zn_3Mg_3)$ и $S(Al_2CuMg)$. Эти фазы обеспечивают в процессе старения высокую прочность сплавов Al-Zn-Mg и Al-Zn-Mg-Cu, однако при этом сплавы остаются хрупкими и коррозионно нестойкими и применять их в силовых конструкциях нельзя.

Фридляндером И.Н. [6] были подробно изучены закономерности изменения структуры, механических, физических и коррозионных свойств, эффектов закалки и старения в четвертной системе Al-Zn-Mg-Cu и прилегающих к ней тройных системах Al-Zn-Mg

Была установлена фундаментальная закономерность: при определенных соотношениях Zn, Cu и Mg, фаза, содержащая медь, не образуется, медь целиком входит в пересыщенный твердый раствор и не участвует в образовании Cu-содержащих фаз; интегральная прочность сплава увеличивается не только за счет образования метастабильных частиц упрочняющих фаз, но и благодаря повышению прочности пластичного пересыщенного твердого раствора. Благоприятное воздействие пластичного пересыщенного медью твердого раствора приводит к тому, что в определенной концентрационной области четверной системы Al-Zn-Mg-Cu при увеличении содержания Mg одновременно растут прочность, пластичность, вязкость сплавов и их коррозионная стойкость. Таким образом, Фридляндер создал теорию и технологию получения алюминиевых высокопрочных, сверхвысокопрочных, жаропрочных, криогенных и сверхлегких сплавов, что было одним из определяющих факторов для создания в стране передовой авиационной, ракетной и ядерной промышленности. Им созданы новые многокомпонентные системы на основе алюминия (прежде всего Al-Zn-Mg-Cu; Al-Mg-Cu; Al-Li-Mg; Al-Li-Mg-Sc; Al-Li-Mg-Cu-Zn; Al-Be-Mg), использованы скоростные процессы кристаллизации из расплава, изучены закономерности формирования

структуры при старении и изменения комплекса свойств на различных стадиях старения. На основе изучения многокомпонентных систем и изменений комплекса свойств при старении была разработана серия промышленных сплавов, которые на протяжении десятков лет являлись основным конструкционным материалом всех советских (российских) самолетов и ракет. В 1950–1970 гг. разработал новый класс высокопрочных алюминиевых сплавов, легированных цинком, магнием, медью, — В95, В93, В96в, В96ц-З, намного превосходящих все ранее известные алюминиевые сплавы. Эти сплавы явились основой конструкции советских истребителей КБ Микояна, Яковлева, Сухого; бомбардировщиков Ту16, Ту95, пассажирских и транспортных самолетов Ил86, Ил76, рис. 105, “Антей” и “Руслан” фирмы Антонова, давая снижение веса конструкции 12–15%.



Рисунок 105. Военно-транспортный самолет Ил 76

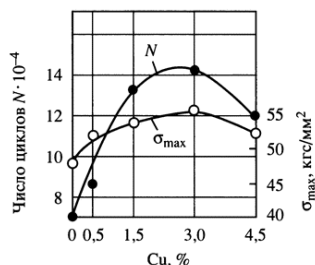
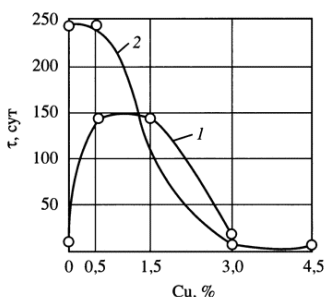


Рисунок 106. Зависимость коррозионной стойкости сплавов Al-Zn-Mg-Cu от содержания меди: 1 — 6%Zn, 2%Mg; 2—4%Zn, 1,5%Mg (без Mn и Cr); τ — время до разрушения образцов

Рисунок 107. Влияние содержания меди на свойства сплавов Al-Zn-Mg-Cu (0,4%Mn; 0,2%Cr) при повторно-статическом растяжении. Максимальное напряжение цикла $\sigma_{max} = 0,7\sigma_B$ (6%Zn, 2%Mg)

Сплавы системы Al-Mg-Si (АВ, АД31, АД33, АД35) менее прочны, чем дуралюмины, но более пластичны и обладают лучшей коррозионной стойкостью. Из сплавов АВ ("авиалей") изготавливают листы, профили, трубы, поковки и штамповки. Сочетание достаточной прочности с высокой технологичностью и хорошей коррозионной стойкостью, удовлетворительной свариваемостью определяют широкое применение сплава АД31 в машиностроении (отделка легковых автомобилей, корпуса приборов), в строительстве и др.

Сплавы системы Al-Mg-Si-Cu (АК6, АК8) сочетают высокую прочность и хорошую пластичность в нагретом и холодном состоянии. Поковки и штамповки сложной конфигурации этих сплавов широко применяются во многих отраслях промышленности.

Сплавы на основе Al-Cu-Mg с добавками Fe и Ni (АК4, АК4-1) применяются для изготовления поволоков и штамповок, работающих при температурах 200-250°C (например, штампованные поршни).

Сплавы на основе Al-Cu-Mn с добавками Ti, Zr, V (Д20; 1201) имеют высокие механические свойства как при низких (до -250 °C), так и при высоких (до + 250 °C) температурах. Из данных

сплавов изготавливают все виды деформированных полуфабрикатов: листы, трубы, профили, штамповки, поковки.

Сплавы на основе систем $Al-Zn-Mg$ (1915) и $Al-Zn-Mg-Cu$ (B93, B95 и их модификации) являются термически упрочняемыми. Из данных сплавов изготавливают все виды деформированных полуфабрикатов: листы, плиты, профили, трубы, поковки, штамповки, которые могут применяться во многих отраслях промышленности, строительства и др.

Литейные алюминиевые сплавы предназначаются для получения сложных фасонных отливок. К литейным сплавам предъявляются достаточно высокие требования. Они должны обладать высокой жидкотекучестью, сравнительно небольшой усадкой, малой склонностью к образованию горячих трещин и пористости в сочетании с хорошими механическими и технологическими свойствами. Высокими литейными свойствами обладают сплавы, содержащие в своей структуре эвтектику. Поэтому содержание легирующих элементов в литейных сплавах значительно выше. Все дефекты литой структуры, зависящие от литейных свойств (усадочная и газовая пористость, ликвационная неоднородность состава, микротрещины), сохраняются в изделии, рис. 108.



Рисунок 108. Типовая алюминиевая отливка завода MGG по Сейатцу-процессу на линии HWS-Sinto. Корпус теплообменника конденсатора, удостоенный награды "Aluminium Award 2000". Вес 32,9 кг

Основными легирующими элементами в алюминиевых сплавах являются Mg , Cu , Si , Zn . Образование интерметаллидов в сплавах $Al-Cu$, $Al-Mg$, $Al-Mg-Si$, $Al-Cu-Mg$, $Al-Zn-Mg$, "удобное" расположение эвтектики в сплавах $Al-Si$, существенная и переменная растворимость элементов в твердом алюминии в

Инженерное художественное материаловедение

сплавах Al–Cu, Al–Mg, Al–Mg–Zn – все это делает возможным использование различных методов упрочнения сплавов, в том числе дисперсионное твердение путем закалки и старения. В качестве вспомогательных элементов используются Mn, Cr, V, Ti, Mo, Ni, Nb, Zr и др., которые дают устойчивые тугоплавкие интерметаллиды. Этим легирующим элементом отводится следующая роль:

- дополнительное упрочнение по растворному типу;
- пластифицирование – улучшение технической пластичности за счет измельчения структуры;
- повышение прочности, в том числе жаропрочности за счет образования сложных, термически устойчивых интерметаллидных фаз и структуры каркасного типа.

В табл. 39 приведен состав основных литейных сплавов, разбитых по системам.

Таблица 39

Сплавы основные алюминиевые литейные в отливках
(ГОСТ 1583–93)

Марка сплава	Массовая доля элементов (Al-основа), %					Прочие элементы
	Mg	Si	Mn	Cu	Ti	
1	2	3	4	5	6	7
Сплавы системы Al–Si						
AK12(АЛ2)	0,1	10-13	0,5	0,60	—	0,1Zr
Сплавы системы Al–Si–Mg						
AK9 (AK9)	0,2-0,4	8-11	0,2-0,5	1,0	—	0,9Zn; 0,3Ni
AK9ч (АЛ4)	0,10	8-10,5	0,2-0,5	0,3	—	0,15Zr+Ti
AK8л (АЛ34)	0,35-0,55	6,5-8,5	—	—	0,3	0,15-0,4Be
AK7 (AK7)	0,2-0,4	6-8	0,2-0,6	—	—	
AK7ч (АЛ9)	0,2-0,4	6-8	—	—	—	
AK10Cu (AK10Cu)	0,1-0,5	9-11	0,3-0,6	—	—	0,1-0,25Sb
Сплавы системы Al–Si–Cu						
AK5M2 (AK5M2)	0,2-0,8	4-6	0,2-0,8	1,5-3,5	0,05-0,20	

Инженерное художественное материаловедение

AK5M (АЛ5)	0,35- 0,6	4,5- 5,5	—	1,0- 1,5	—	
AK6M2 (AK6M2)	0,30- 0,45	5,5- 6,5	—	1,8- 2,3	0,1-0,2	
AK8M (АЛ32)	0,3-0,5	7,5-9	0,3- 0,5	1,0- 1,5	0,1-0,3	
AK5M4 (AK5M4)	0,2-0,5	3,5- 6,0	0,2- 0,6	3-5	0,05- 0,2	
AK8M3 (AK8M3)	—	7,5- 10	—	2,0- 4,5	—	
AK9M2 (AK9M2)	0,2-0,8	7,5- 10	0,1- 0,4	0,5- 2,0	0,05- 0,2	
AK12M2 (AK12M2)	—	11- 13	—	1,8- 2,5	—	0,6-1,0 Fe
AK12M2MгH (АЛ25)	0,8-1,3	11- 13	0,3- 0,6	1,5- 3,0	—	0,05-0,20Fe 0,8-1,3Ni
AK12MMгH (АЛ30)	0,8-1,3	11- 13	—	0,8- 1,5	—	0,8-1,3Ni

AK21M2,5H2,5 (ВКЖЛС-2)	0,2- 0,5	20- 22	0,2- 0,4	2,2- 3,0	—	0,1-0,3 Fe 2,2-2,8 Ni; 0,2-0,4Cr
Сплавы системы Al–Cu						
AM5 (АЛ 19)	0,05	0,30	0,6- 1,0	4,5- 5,3	0,15- 0,35	0,2Zr; 0,1Ni; 0,2 Zn
AM4,5Кд (ВАЛ110)	—	—	0,35- 0,8	4,5- 4,9	0,15- 0,35	0,07- 0,25Cd; 0,1 Zn 0,15Zr
Сплавы системы Al–Mg						
AMг5Mц (АЛ28)	4,8- 6,3	—	0,4- 1,0	0,30	0,05- 0,15	
AMг6л (АЛ23)	6-7	—	—	—	0,05- 0,15	0,05-0,2Zr; 0,02-0,1Be
AMг10 (АЛ27)	9,5- 10,5	—	—	—	0,05- 0,15	0,05-0,2Zr; 0,05- 0,15Be

АМг11 (АЛ22)	10,5-13,0	0,8-1,2	—	—	0,05-0,15	0,03-0,07Be; 0,1Zn
АМг7(АЛ29)	6-8	0,5-1,0	0,25-0,60	0,1	—	0,2Zn; 0,01Be
Сплавы Al – прочие компоненты						
АК7Ц9 (АЛ11)	6-8	0,5-1,0	0,25-0,60	—	—	7-12Zn
АК9Ц6 (АК9Ц6р)	0,3-0,5	8-10	0,1-0,6	0,3-1,5	—	5-7 Zn 0,3-1,0Fe 0,3Ni 0,3(Pb+Sn)
АЦ4Мг(АЛ24)	1,5-2,0	—	0,2-0,5	0,20	0,1-0,2	3,5-4,5Zn 0,1Be 0,1 Zr

Сплавы на основе Al–Cu. К особенностям этой системы относятся (см. рис. 39):

1) значительная растворимость Cu в Al в твердом состоянии ($C_p=5,65\%$ Cu), позволяющая применять для упрочнения закалку и старение. Упрочняющими фазами являются дисперсные выделения Cu Al_2 ;

2) эвтектика сдвинута к твердому и хрупкому интерметаллиду $CuAl_2$ и большей частью состоит из него;

3) сплавы Al–Cu являются широкоинтервальными и отличаются пониженной жидкотекучестью, склонностью к образованию пористости и горячих трещин.

Сплавы системы Al–Cu АМ5(АЛ19), АМ4,5Кд(ВАЛ10) после термической обработки (закалка + старение при 175°C , 3-5ч.) обладают высокими механическими свойствами ($\sigma_b=350$ и 420МПа , $\delta=6$ и 7%), хорошо обрабатываются резанием. Вместе с тем эти сплавы малоустойчивы против коррозии и нуждаются в дополнительной защите (анодирование, окрашивание).

Сплавы на основе Al–Mg. Особенности диаграммы системы Al–Mg (см.рис. 103), определяющие состав и технологические свойства, следующие:

1) концентрация эвтектической точки ($C_э=33\%$ Mg) незначительно отличаются от концентрации магния (38%) в интерме-

таллиде Al_3Mg_2 , и эвтектика практически состоит из интерметаллида Al_3Mg_2 . Из-за твердости и хрупкости эвтектические сплавы, несмотря на хорошую жидкотекучесть, практического использования не имеют;

2) магний хорошо растворяется в алюминии ($C_p=17,4\%$ Mg). Несмотря на значительное изменение растворимости с понижением температуры, выделение вторичных дисперсных частиц β – фазы (Mg_2Al_3) не дает существенного упрочнения, поэтому старение не применяется. Упрочнение в сплавах Al–Mg достигается за счет растворного упрочнения;

3) сплавы являются широкоинтервальными, они склонны к дендритной ликвации и неравновесной эвтектике, обладают низким комплексом литейных свойств.

В системе Al–Mg с увеличением концентрации магния до 13% прочность возрастает, а пластичность остается высокой при содержании магния до 11%, а затем резко падает.

Сплавы системы Al–Mg выделяются наиболее высокой прочностью и пластичностью среди всех литейных алюминиевых сплавов, превосходя по этим показателям многие деформируемые сплавы, табл. 40.

Таблица 40

Типичные механические свойства системы Al–Mg при литье в песчаную форму без термообработки (отдельно отлитые образцы)

Сплав	Сплав	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
АМг 5К	(АЛ13)	170	100	3
АМг5Мц	(АЛ28)	210	120	4
АМг 6л	(АЛ23)	200	120	4
АМг 10	(АЛ27)	375	200	22

Сплавы Al–Mg хорошо обрабатываются резанием. Характерной особенностью этих сплавов являются очень высокая коррозионная стойкость в атмосфере и морских условиях.

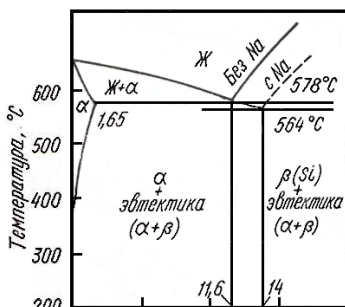


Рисунок 109. Фрагмент диаграмма Al - Si

Сплавы на основе Al-Si (силумины) – двойные силумины (на основе Al-Si) и специальные силумины (на основе Al-Si-Me) – являются наиболее распространенными алюминиевыми литейными сплавами [10]. Это связано с хорошими литейными свойствами, определяемыми видом диаграммы состояния, рис.109. Эвтектическая точка ($C_p=11,7\%$ Si) смещена к чистому алюминию, поэтому основой эвтектики $\alpha + \text{Si}$ (каркасно-матричного типа) является α -твердый раствор. Наиболее распространен сплав АК12 (АЛ2), содержащий 10-13% Si и обладающий высокой коррозионной стойкостью.

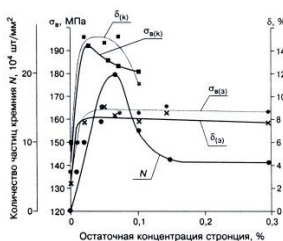


Рисунок 110. Влияние Sr на механические свойства силумина (б): индекс k – литье в металлическую форму, з – в песчаную форму [1]

Кремний при затвердевании эвтектики выделяется в виде грубых кристаллов игольчатой формы, которые играют роль внутренних надрезов и снижают пластичность ($\delta=0,5-1,0\%$). Модифицирование натрием или стронцием резко измельчает включения кремния в эвтектике и повышает комплекс пластических свойств ($\delta=5-8\%$), рис. 110,111.

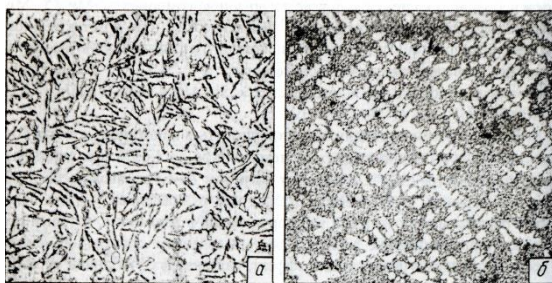


Рисунок 111. Структура эвтектического силумина (11.7%Si), отличного в песчано-глинистую форму. $\times 320$: а- сплав не модифицирован; б- сплав модифицирован [14]

Для получения эффекта упрочнения при термической обработке (закалка + искусственное старение) в двойные сплавы $Al-Si$ вводят добавки магния и меди отдельно или совместно. Эти компоненты образуют интерметаллиды с переменной растворимостью в твердом состоянии, которые служат эффективными упрочнителями при термической обработке, табл. 41.

Таблица 41

Типичные механические свойства силуминов
(отдельно отлитые образцы)

Сплав	Способ литья и термообработки	$\sigma_B, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
АК12 (АЛ2)	Литье в песчаную форму после модифицирования	180	80	7
АК9ч (АЛ4)	Литье в песчаную форму после модифицирования, закалка + старение	260	200	4
АК7ч (АЛ9)	Литье в песчаную форму, закалка + старение	200	110	6
АК5М (АЛ5)	Литье в песчаную форму, закалка + старение	220	180	1
АК8Л (АЛ34)	Литье в песчаную форму, закалка + старение	330	280	3
ЛК12М2 MgH (АЛ25)	Литье в кокиль, старение без закалки	200	—	—

AK21M2 ,5H2,5	Литье в кокиль, отжиг	170	—	—
------------------	-----------------------	-----	---	---

Специальные силумины имеют отличные литейные свойства: высокую жидкотекучесть, хорошую герметичность, относительно небольшую линейную усадку (0,8–1,0 %). Применяются для изготовления ответственных, сложных и крупногабаритных деталей (картеров двигателей внутреннего сгорания, сложных по конфигурации корпусных деталей, головок цилиндров двигателей воздушного охлаждения, шкивов зерноуборочных комбайнов, для мало – и средненагруженных деталей приборов, агрегатов и двигателей, а также для бытовых изделий).

Высоколегированные заэвтектические силумины AK12M2MgH(Al125) и AK21M2,5H2,5 относятся к группе поршневых сплавов (применяются только для отливки поршней двигателей внутреннего сгорания). Имея невысокую прочность, эти сплавы предназначены для работы при повышенных температурах (250–270 °C), отличаются высокой жаропрочностью, износостойкостью и низким коэффициентом термического расширения.

Сложные сплавы Al–Cu–Mg и Al–Mg–Zn. Литейные сплавы системы Al–Cu–Mg (Al11, Al21 и др.) по своей природе близки к дуралюминам. Упрочнение в них достигается за счет растворного механизма и интерметаллидных фаз, образующих дисперсные частицы при термической обработке (закалка + старение). В отличие от деформируемых дуралюминов к литейным сплавам предъявляются менее строгие требования по пластичности. Поэтому в сплавы этой группы для повышения жаропрочности вводят нерастворимые или практически нерастворимые добавки Ni, Cr и Fe, обеспечивающие каркасное упрочнение. Так, сплав Al1(1,25-1,75%Mg; 3,75-4,5%Cu; 1,75-2,25% Ni) с хорошим сочетанием прочности и жаропрочности широко применяли для изготовления поршней авиационных двигателей.

В последнее время сплавы Al11 и Al21 заменяются сплавами системы Al–Cu.

Цинковые силумины – силумины системы Al–Si–Zn: AK7Ц9 (Al11), AK9Ц6, AC4Mg(Al24) – содержат добавки от 5 до 12% Zn, который очень хорошо растворим в алюминии (Cr=82,2% Zn) и создает растворное упрочнение. Важной особенностью цинковых силуминов является их самозакаливаемость, что позволяет их использовать без термической обработки.

Особо следует остановиться на сплаве ВА112 системы $Al-Zn-Mg-Cu$, который после термообработки имеет уникальные для литейных сплавов механические свойства: $\sigma_B = 550$ МПа, $\delta = 3\%$.

Специальные алюминиевые сплавы содержат в качестве легирующих компонентов либо Al_2O_3 , либо в большом количестве очень малорастворимые или практически нерастворимые в твердом алюминии металлы: Cr, Zr, Fe, Ni и т.д.

Сплавы на основе Al – Al_2O_3 (САПы). САП (спеченный алюминиевый порошок) представляет собой материал, который получают прессованием и последующим спеканием алюминиевого порошка (пудры), состоящего из чешуек толщиной 1 мкм.

Основное преимущество САПов перед алюминиевыми сплавами – высокая жаропрочность (350-500°C).

Технология изготовления полуфабрикатов из САПа включает следующие операции:

1) получение алюминиевой пудры путем пульверизации (разбрызгивания) жидкого алюминия и последующего размола в шаровых мельницах);

2) холодное брикетирование пудры (методом засыпки в контейнер пресса и сжатие под давлением 300-750 МПа);

3) вакуумная дегазация брикетов (обеспечивает уменьшение содержания водорода до 1-2 см³ (100 г металла);

4) горячая подпрессовка или спекание нагретых брикетов до 400-450°C под давлением 400-600 МПа в течение 3-5 мин.;

5) получение из брикетов полуфабрикатов горячей (и последующей холодной) деформацией.

Механические свойства САПа значительно отличаются от механических свойств литого или деформированного технического алюминия, табл. 42.

Таблица 42

Состав и типичные механические свойства
прессованных прутков из сплава типа САП

Сплав	Компоненты (Al-основа), %		20°C			500°C		
	Al ₂ O ₃	Fe	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
САП-1	6-9	< 0,25	300	200	8	80	—	2
САП-2	9,1-13,0	< 0,20	330	230	4	0	80	1

САП-3	13,1-18,0	< 0,20	400	340	3	120	—	1
-------	-----------	--------	-----	-----	---	-----	---	---

Спеченные алюминиевые сплавы (САСы). Спечённые алюминиевые сплавы в качестве легирующих элементов имеют Si, Ni, Fe и другие компоненты. Спеченные из порошков сплавы САС-1 (25-30% Si, 5-7%Ni) и САС-2 (25-30% Si, 5-7% Fe) отличаются очень низким коэффициентом термического расширения: для САС-1 $\alpha = 14,5 \cdot 10^{-6} - 15,5 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$, а для САС-4 $\alpha = 16 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$.

Изделия из сплавов САС-1 и САС-2 изготавливают из порошков, полученных пульверизацией жидких сплавов, что обеспечивает достаточно равномерную дисперсную структуру. Так, САС-1 содержит в своей структуре довольно мелкие включения кремния и интерметаллидов и обладает вполне удовлетворительными механическими свойствами: $\sigma_B = 220-240 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 210-230 \text{ МПа}$, $\delta = 0,5\%$.

Алюминий в декоративно-прикладном искусстве. Алюминий и его сплавы широко используются в художественной промышленности его используют наряду с чугуном для крупных архитектурных деталей и скульптур, для различных предметов убранства интерьеров, которые теперь заменяют бронзовые украшения. В ювелирной промышленности алюминий заменяет серебро и золото. Из деформируемых алюминиевых сплавов изделия получают методами пластической деформации. На рис. 112, 113 показаны алюминиевые чеканные изделия: мемориальный комплекс в г. Ростове-на-Дону, любительская работа, выполненная методом металлопластики из тонкого алюминиевого листа и статуя «Мать-Грузия».



1



2

Рисунок 112. Мемориальный комплекс в г. Ростове-на-Дону

(1) и портрет Фараона (2)

Литейные алюминиевые сплавы в основном базируются на системах Al-Si (сплав АК12) и Al-Si-Me (сплавы АК9, АК9Су, АК8М и др.). Литейные алюминиевые сплавы обладают достаточно высокими механическими свойствами ($\sigma_{\text{в}}=180-260$ МПа, $\delta=3-6\%$), хорошими литейными и технологическими свойствами. Это предопределило их широкое применение наряду с чугуном для изделий промышленного производства и художественного литья, рис.114-115.

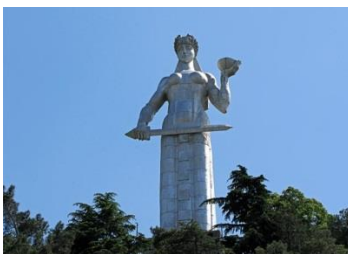


Рисунок 113. Символ Грузии – статуя «Мать-Грузия», стоящая на Святой горе в г. Тбилиси, скульптор Э.Д. Амашукели. 1958 год

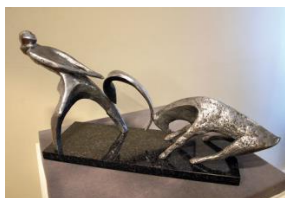


Рисунок 114. Боец. Е. Ф. Белашова, 1957 г.



Инженерное художественное материаловедение

Рисунок 115. Мечтание. Е. Ф. Белашова. Алюминий. 1957 г.
На рис. 116 и 117 показаны декоративно-прикладные поделки промышленные изделия из алюминия.



http://www.slovoart.ru/sites/default/files/images/24/05-prostranstvo/04-vrata/Fedorov_1.jpg

Рисунок 116. В.М. Федоров. Аркан. Алюминий, гранит. 2008.
Якутск (а) и подвеска из Al-проволоки диаметром 1.4мм.

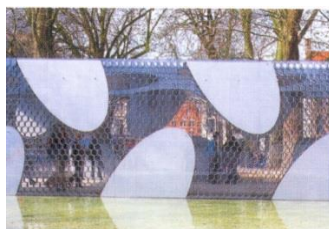


Рисунок 117. Изделия из алюминия: а - поезд «Синкансан-500», Япония; б – пешеходный переход в Брюгге, Бельгия; в – «Мост честолюбия», Англия

К художественным изделиям из алюминия можно также отнести работы «В космос» скульптора В. Шевченко (Рязань, Крас-

нодар), «Защитники Брестской крепости» скульптора А. Потриво-ва (Брест), «Колхозница со снопом» скульптора С. Буянина и др. Алюминий не сразу завоевал симпатии скульпторов и зрителей. Было время да и сейчас многие считают алюминий второстепенным материалом. В работе [12] рекомендуется использовать алюминий, который хорошо имитирует цвета пластмасс, минералов или древесины, как их заменителей, а в работе [53] говорится, что «алюминий вообще не подходит для творческих работ». С другой стороны, в работе [25] отмечается, что интерес к алюминию как художественному материалу постоянно возрастает.

Серый цвет алюминия, его мягкость, легкость, пластичность являются его естественными свойствами и производят спокойное ненавязчивое впечатление. Алюминию как самому распространенному на планете металлу пророчат хорошее будущее, в том числе и в художественном производстве.

10.2. Магний и его сплавы

Магний – серебристо-белый металл, очень легкий ($\rho = 1,74 \text{ г/см}^3$); температура плавления 651°C , температура кипения 1103°C , рис. 118. Кристаллическая решетка гексагональная плотноупакованная Г12 ($a=0,32 \text{ нм}$, $c=0,52 \text{ нм}$, $c/a=1,62354$). Магний не претерпевает полиморфных превращений.



Рисунок 118. Магний - лёгкий, ковкий, серебристо-белый металл

Чистый магний характеризуется высокой химической активностью и легко окисляется. Оксидная пленка MgO имеет значительно большую плотность ($3,2 \text{ г/см}^3$), чем чистый магний, и склонна к растрескиванию. При нагреве оксидная пленка теряет свои защитные свойства, скорость окисления магния увеличивается

ется, и при 623 °С магний воспламеняется и горит, излучая ослепительный яркий свет.

Механические свойства технического магния низкие и характеризуются следующими данными, табл. 43.

Таблица 43

Механические свойства технического магния

Состояние поставки	σ_B , МПа	δ , %	НВ
Литой	85-130	3-6	30
Деформированный	250	8-10	50
Отожженный	180	15-17	40

Свойства магния значительно улучшаются при легировании. Сплавы магния характеризуются низкой плотностью (около 1,8 г/см³), высокой удельной прочностью, способностью хорошо поглощать вибрации. Они хорошо обрабатываются резанием, хорошо свариваются. К недостаткам относятся меньшая коррозионная стойкость, чем у алюминиевых сплавов, трудности при выплавке и литье, и необходимость нагрева при обработке давлением. В качестве легирующих элементов используют алюминий до 10%, цинк до 5–6 %, марганец до 2,5% и цирконий до 1,5 %. Для получения специальных свойств применяют также Li, Ce, Cd, Th, Nd, Y.

Историческая справка. Первые магниевые сплавы появились в начале XX века (под названием «электрон», теперь мало употребляемым). Значение конструкционных промышленных материалов магниевые сплавы приобрели в конце 20-х — начале 30-х годов XX века, то есть почти через 100 лет после того как французский химик А. Бюсси впервые выделил магний в чистом виде (1828). До конца 40-х годов применялись главным образом сплавы на основе систем Mg — Al — Zn и Mg — Mn. Дальнейшему прогрессу в области создания магниевые сплавы способствовало открытие модифицирующего и рафинирующего действия циркония. В 50-х годах начали применяться сплавы на основе систем Mg — Zn — Zr, Mg — р. з. м. (редкоземельный металл) — Zr (или Mn), Mg — Th, а также сверхлёгкие сплавы на основе системы Mg — Li. Производство и потребление магния и М. с. возрастает. Мировое производство магния к началу 2-й мировой войны 1939—45 составило около 50 тысяч т, в 1969 Магниевые сплавы 2 млн. т, из них Магниевые сплавы 40—50% расходуется на производство отливок и деформированных полуфабрикатов.

Алюминий образует с магнием систему эвтектического типа с большой растворимостью в твердом состоянии ($C_p=12,7\%$ Al) и интерметаллидной фазой Mg_4Al_3 .

Цинк также образует эвтектическую систему со значительной растворимостью ($C_p=8,4\%$ Zn) и интерметаллидной фазой Mg_7Zn_3 ($MgZn_2$).

В системах Mg–Al и Mg–Zn наличие интерметаллидов и переменная растворимость в твердом состоянии делают в принципе возможной термическую обработку – закалку и старение. Однако эффект упрочнения при старении незначительный (25–35%). Поэтому растворное упрочнение играет основную роль. Это относится и к тройной системе Mg–Al–Zn, в которой дополнительно образуется самостоятельная упрочняющая фаза $T(Mg_3Al_2Zn_3)$, которая выделяется по границам зерен.

Марганец в количестве до 2,5% вводится в магниевые сплавы для повышения коррозионной стойкости, получения мелкозернистой структуры и увеличения прочности.

Цирконий вводится в деформируемые магниевые сплавы для улучшения их пластичности в горячем состоянии

На рис. 119 показаны диаграммы состояния Mg с основными легирующими элементами.

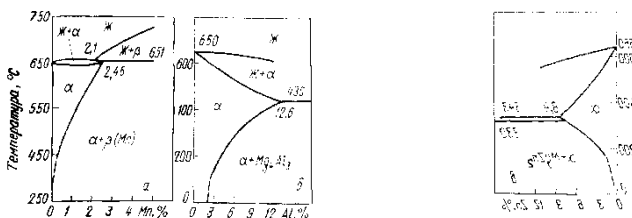


Рисунок 119. Диаграммы состояния магниевых сплавов:
а – Mg–Mn; б – Mg–Al; в – Mg–Zn

Различают деформируемые и литейные магниевые сплавы. Деформируемые сплавы маркируются буквами МА, литейные – буквами МЛ, далее следует номер сплава. Состав и свойства некоторых магниевых сплавов приведены в табл. 44.

Таблица 44

Химический состав и механические свойства
некоторых магниевых сплавов

Марка сплава	Содержание элемента, %			Режим ТО	σ _в , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %
	Al	Zn	Другие элементы				
Деформируемые сплавы (ГОСТ 14957–76)							
МА 1	—	—	1,3-2,5Mn	О	200	130	8
МА 2	3,0-4,0	0,2-0,8	0,15-0,5Mn	О	270	170	10
МА 5	7,8-9,2	0,2-0,8	0,15-0,5Mn	3-С	320	220	14
МА 14	—	5,0-6,0	0,3-0,9Zr	3-С	350	300	9
МА 18	0,5-1,0	2,0-2,5	0,1-0,4Mn; 10-11,5Li; 0,15-0,35 Ce	О	170	130	30
МА 19	—	5,5-7,0	0,5-1,0Zr; 0,2-1,0 Cd; 1,4-2,0 Nd	3-С	380	330	5
МА 20	—	1,0-1,5	0,05-0,12Zr; 0,12-0,25Ce	О	250	160	20
ВДМ-1	—	1,2-2,0	2,5-3,5Th	О	300	250	5
Литейные сплавы (ГОСТ 2856–79)							
МЛ 5	7,5-9,0	0,2-0,8	0,15-0,5Mn	О	160	85	3
МЛ 8	—	5,5-6,6	0,7-1,1 Zr; 0,1-0,8 Cd	3-С 3-С	255 255	120 155	6 5
МЛ 10	—	0,1-0,7	0,4-1,0 Zr; 2,2-2,8 Nd	3-С	230	140	3
МЛ 14	—	1,8-2,2	0,4-1,0 Zr; 2,5-2,9 Th	С	200	—	8
МЛ 19	—	0,1-0,6	0,4-1,0 Zr; 1,6-2,3 Nd; 1,4-2,2 Y	3-С	220	120	3

Примечание: ТО – термообработка; O – отжиг; 3-C – закалка–старение; C – старение

Деформируемые магниевые сплавы применяют в виде прутков и фасонных профилей для изготовления деталей горячей штамповкой. Для улучшения пластичности обработку давлением ведут при температурах 350–450°C, так как гексагональная решетка магния затрудняет их деформацию при комнатной температуре.

Из магниевых сплавов изготавливают кованные и штампованные детали сложной формы, такие как автомобильные диски.

Наиболее прочными деформируемыми сплавами являются сплавы магния с алюминием (МА5) и магния с цинком, легированные цирконием (МА14), кадмием, РЗМ и другими элементами (МА15, МА19 и др.).

Алюминий и цинк являются эффективными упрочнителями твердого раствора при концентрации не более 10 и 6% соответственно. При большем содержании этих элементов пластичность резко снижается. Появление при старении в структуре упрочняющих интерметаллидов Mg_4Al_3 и $MgZn_2$ осуществляет дополнительное упрочнение. Цирконий измельчает зерно, а кадмий и редкоземельные элементы (РЗМ) одновременно повышают и прочность, и пластичность.

Сплав МА1, легированный только ~ 2% Mn, характеризуется высокой пластичностью и применяется как листовой материал.

Литейные магниевые сплавы. Магниевые литейные сплавы классифицируют по химическому составу; основная группа промышленных сплавов принадлежит трем системам: Mg–Al–Zn (наиболее распространенные): Mg–Zn–Zr и Mg–РЗМ–Zn. Кроме того, находят ограниченное применение сплавы Mg–Mn (коррозионно-стойкие); Mg–Li (сверхлегкие, $\rho = 1,3\text{--}1,65 \text{ г/см}^3$) и Mg–Th (жаропрочные). Магниевые сплавы систем Mg–Al, Mg–Zn и Mg–Al–Zn являются широкоинтервальными. Они склонны к усадочной пористости, которая снижает механические свойства и герметичность отливок. Широкий интервал кристаллизации $\Delta t_{кр}$ приводит также к образованию горячих трещин и к дендритной ликвации. Линейная усадка лежит в пределах 1,1–1,4%, усадочная раковина незначительная. Литейные свойства основных магниевых сплавов приведены в табл. 45.

Таблица 45

Литейные свойства магниевых сплавов

Свойства	g– n	g–Al–Zn				g–Zn– Zr		g–Nd– Zr		g Th
	Л2	Л4	Л5	Л6	Л 2	Л 5	Л	Л 0	Л14	

Инженерное художественное материаловедение

$t_{кр} = t_L - t_S$	0	55	15	20	5	5	5	5	
идкотекучес ть, мм	00	35	90	35	80	20	50	50	30
бразование рыхлот (ye)									
орячеломко сть (ye)	0	7	0	7	2	0	2	0	

Примечание: $\Delta t_{кр} = t_L - t_S$ – разность температур ликвидуса и солидуса; ye – условные единицы.

В литом состоянии магниевые сплавы хрупки из-за образования по границам зерен большого количества неравновесной эвтектики. При гомогенизации (420°C, 12–24 ч) неравновесные выделения интерметаллидов растворяются, значительно повышается пластичность, а также прочность сплавов. Охлаждение на воздухе является для сплавов закалкой, так как фиксируется значительное пересыщение твердого раствора. Максимальные прочностные свойства достигаются после дополнительного искусственного старения при 175 °C – 16 ч, а при 190°C – 4–8 ч.

Сплавы МЛ4, МЛ5 применяют для нагруженных деталей двигателей и агрегатов, работающих при статических и динамических нагрузках, для корпусных деталей приборов, кронштейнов и т.п., эксплуатирующихся в условиях повышенной коррозионной стойкости при температурах не выше 150 °C.

Модифицирование магниевых сплавов дает значительный эффект измельчения первичных выделений твердого раствора и включений интерметаллидов, что приводит к улучшению комплекса механических и особенно технологических свойств.

Применение магниевых сплавов в автомобильной промышленности является сравнительно новым направлением, с новыми требованиями к ним, как конструкционным материалам.. В настоящее время проводятся масштабные научно-исследовательские работы, в результате которых создаются научные основы для более широкого использования магниевых сплавов не только в виде литых под давлением, но и в виде деформированных полуфабри-

катов - плит, листов, длинномерных прессованных изделий и поковок как в автомобильной промышленности, так и в других областях техники, где низкая плотность магниевых сплавов окажется оправданной с экономической точки зрения. Так, например, *североамериканский концерн General Motors объявил о начале испытаний кузовных деталей на основе магниевого сплава. Применение этого материала позволит уменьшить вес кузова автомобиля, что фактически приведет к снижению расхода топлива.*

В России прорабатывается проект строительства завода "Русский магний", который будет выпускать металлический магний и осажденный диоксид кремния с наноразмерной структурой; этот проект находится в процессе реализации, рис. 120.



Рисунок 120. Знак начала строительства завода «Русский магний»



1

2



3

Рисунок 121. Изделия из магниевых сплавов: 1 - Магниевые клише 2 - Pentax K-7: аппарат заключён в защищённый от пыли и влаги прочный корпус из магниевого сплава

Город будущего. Люди будущего смогут поселиться в небольших плавучих городах, дрейфующих по Тихому океану подобно огромным водным лилиям. "Зеленый поплавок" (Green Float) состоит из ячеек-районов, каждая из которых с комфортом приютит от 10 до 50 тысяч жителей; пешеходный радиус ячейки – километр, рис. 122. Большинство обитателей "Зеленых поплавков" будут жить в "Небесном городе" – небоскребе километровой высоты, занимающем центр ячейки. Прочие поселятся в жилых зонах вокруг границы ячейки. Центральные башни будут окружать пастбища и леса; посему можно предположить, что ячейки смогут обеспечивать себя всем необходимым пропитанием. Окрест "Небесного города" найдется место и фермам, специализирующимся на крупном рогатом скоте, и иным сельхозпроизводствам. И все это, все-все, будет построено на решетчатой понтонной конструкции, состоящей из 7000-тонных сот.

http://images.yandex.ru/yandsearch?source=psearch&img_url=http%3A%2F%2Fwww.74rif.ru%2Fflab.files%2Fmshema.jpg&nojs=1&p=4&text=%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%8B%20%D0%B2%20%D1%85%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%BC%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5&noask=1&pos=144&rpt=simage&lr=39http://images.yandex.ru/yandsearch?source=psearch&img_url=http%3A%2F%2Fmsk.blizko.ru%2Fsystem%2Fimages%2Fproduct%2F000%2F825%2F028_original.jpg&nojs=1&p=4&text=%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%8B%20%D0%B2%20%D1%85%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%BC%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5

[http://images.yandex.ru/yandsearch?source=pssearch&img_url=http%3A%2F%2Fmegasklad.ru%2Fdata%2Fphotos%2Fs509533.jpg&nojs=1&p=1&text=%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%8B%20%D0%B2%20%D1%85%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%BC%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5&noreask=1&pos=49&rpt=simage&lr=39](http://images.yandex.ru/yandsearch?source=pssearch&img_url=http%3A%2F%2Fmegasklad.ru%2Fdata%2Fphotos%2Fs509533.jpg&nojs=1&p=1&text=%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%8B%20%D0%B2%20%D1%85%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%BC%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5&noreask=1&pos=146&rpt=simage&lr=39)http://images.yandex.ru/yandsearch?source=pssearch&img_url=http%3A%2F%2Fimg.board.tut.ua%2F200%2Fs%2Fsv%2Fsva%2Fsvarka_7891550.jpg&nojs=1&p=1&text=%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D0%B5%20%D1%81%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%B2%D1%8B%20%D0%B2%20%D1%85%D1%83%D0%B4%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%BC%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B5&noreask=1&pos=51&rpt=simage&lr=39

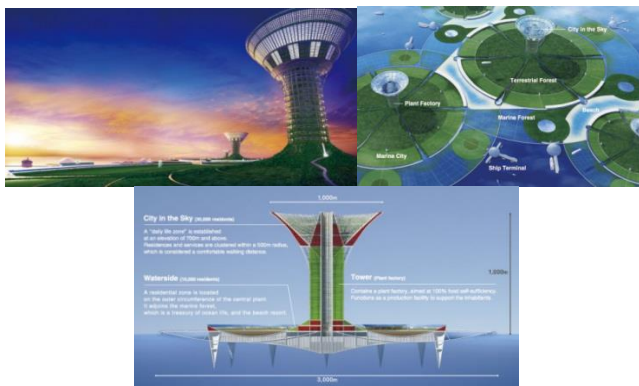


Рисунок 122. «Зелёный поплавок» (Green Float) состоит из

ячеек (районов), каждая из которых с комфортом приютит от 10 до 50 тыс. жителей

10.3. Титан и его сплавы

Титан – металл серебристо-белого цвета, легкий, тугоплавкий, прочный, пластичный; плотность $\rho=4,5$ г/см³, температура плавления 1668 ± 4 °С. Очень стоек химически благодаря образованию защитной пленки TiO₂.

Титан имеет две полиморфные модификации: α -титан с гексагональной плотноупакованной решеткой Г12 с периодами $a=0,296$ нм, $c=0,472$ нм и высокотемпературную модификацию β -титан с кубической объемно центрированной решеткой КЦ8 с периодом $a=0,332$ нм, температура полиморфного $\alpha \rightleftharpoons \beta$ превращения составляет 882 °С.

Чистый титан имеет следующие механические свойства: $\sigma_{\text{в}}=245$ МПа, $\delta=70$ %. Технический титан изготавливают из чистых его сортов: ВТ1-00 (99,53 % Ti), ВТ1-0 (99,48 % Ti) и ВТ1-1 (99,44% Ti). Технический титан марки ВТ1-1 имеет следующие свойства: $\sigma_{\text{в}}=450\text{--}600$ МПа, $\sigma_{0,2}=380\text{--}500$ МПа, $\delta\geq 25$ %; $\psi \geq 50$ %.

Титан имеет низкий модуль нормальной упругости ($E=112$ ГПа), почти в 2 раза меньший, чем у железа и никеля, что затрудняет изготовление жестких конструкций, для повышения жесткости приходится увеличивать толщину деталей и их массу.

При температуре выше 5000С титан и его сплавы легко окисляются и поглощают водород, который вызывает охрупчивание (водородная хрупкость). Технический титан хорошо обрабатывается давлением, сваривается в виде листов, труб, прутков, проволоки и других полуфабрикатов, но плохо обрабатывается резанием.

Деформируемые титановые сплавы. Для получения сплавов титан легируют Al, Mo, Cr, Sn, Fe, Zr, Nd, Si. Легирование производится для улучшения механических свойств и повышения коррозионной стойкости. Титановые сплавы имеют высокую удельную прочность (отношение $\sigma_{\text{в}}/\rho$), превышающую прочность легированных сталей.

Легирующие элементы оказывают большое влияние на температуру полиморфных превращений, рис.123.

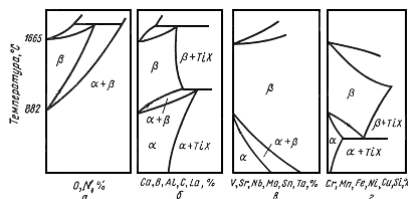


Рисунок 123. Диаграммы состояния сплавов на основе титана (схемы)

Алюминий, кислород и азот повышают температуру превращения и расширяют α -область; их называют α -стабилизаторами. Некоторые элементы образуют с титаном химические соединения (Ti_3Al , Ti_2Cu). Такие элементы, как Mo, V, Mn, Cr, Fe, понижают температуру полиморфного превращения и расширяют область β -фазы; их называют β -стабилизаторами.

Почти все промышленные титановые сплавы легированы Al, так что система Ti-Al в металловедении титана имеет такое же значение (рис. 124), как система Fe-C для сталей.

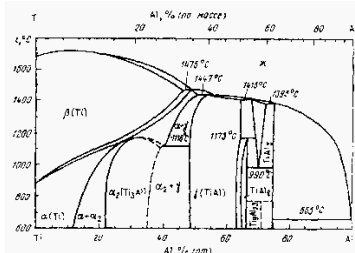


Рисунок 124. Диаграмма состояния Ti-Al [20]

В табл. 46 приведены основные промышленные деформируемые титановые сплавы. За основу классификации приняты соотношения α и β -фаз в структуре сплава и особенности структурных превращений, происходящих при их термической обработке.

Таблица 46

Классификация некоторых титановых сплавов
(ГОСТ 19807-91)

Группа сплавов	Марка сплавов	Средний химический состав, %
1	2	3

Инженерное художественное материаловедение

α -сплавы	BT1-00 BT1- 0 BT5 BT5-1	Нелегированный титан То же Ti – 5Al/– 1,2V – 0,8 Mo Ti – 5Al/– 2,5Sn – 1V
Псевдо α -сплавы	OT4-0 OT4-1 OT4 BT20	Ti – 0,8Al/– 0,8 Mn – 0,3Zr Ti – 1,5Al/– 1,0 Mn – 0,3Zr Ti – 4,5Al/– 1,5 Mn – 0,3Zr Ti – 6,0Al/– 2,0 Mo – 1V – 1Zr
α + β -сплавы мартенситного класса	BT6C BT6 BT14	Ti – 5Al/– 4,0V – 0,3Zr Ti – 6Al/– 4,5V – 0,3Zr Ti – 4,5Al/– 3Mo – 1V – 0,3Zr

α + β -сплавы переходного класса	BT22 BT30 x	Ti – 5Al/– 5Mo – 5V – 1Fe – 1 Cr Ti – 3Al/– 7Mo – 11 Cr
Псевдо β -сплавы	BT35 x BT32 x BT15 x	Ti–3Al/– 1,5 Mo – 15V–3Sn– 3Cr Ti–2,5Al/–8,5Mo–8,5V–1,2Fe– 1,2Cr Ti – 3Al/– 7Mo – 11 Cr
β -сплавы	4201 x	Ti – 33 Mo

Примечание: марки сплавов, отмеченные x, в ГОСТ 19807–91 не включены.

Сплавы с α -структурой характеризуются невысокой прочностью при комнатной температуре и не упрочняются при термообработке, имеют низкую технологическую пластичность.

Псевдо α -сплавы, сохраняя достоинства α -сплавов благодаря присутствию небольших количеств β -фазы (до 5 %), имеют более высокую технологическую пластичность и хорошо обрабатываются давлением.

Двухфазные (α + β) – сплавы характеризуются наилучшим сочетанием механических и технологических свойств. По структуре после закалки различают мартенситный (до 25 % β -фазы) и переходной (до 50 % β -фазы) классы (α + β)–

сплавов.

Псевдо β -сплавы после закалки имеют структуру метастабильной β -фазы. В этом состоянии они имеют хорошую пластичность и сравнительно низкую прочность. После старения их прочность возрастает в 1,5 раза и составляет 1300–1400 МПа.

Однофазные β -сплавы отличаются высокой коррозионной стойкостью. Сплав 4201 может заменить тантал, сплавы на никелевой основе типа хастеллой, также благородные металлы – платину, золото. Однако сплавы со стабильной β – фазой сравнительно редко применяются из-за необходимости их легирования большим количеством изоморфных элементов (V, Mo, Nb), имеющих высокую стоимость, и из-за высокой плотности, понижающей удельную прочность изделий.

Механические свойства титановых деформируемых сплавов в отожженном и термообработанном состоянии приведены в табл. 47 и 48.

Таблица 47

Механические свойства деформируемых титановых сплавов в отожжённом состоянии

Сплав	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²
BT 1-00	300–450	20	50	100
BT 1-0	350–550	15	40	70
BT 5	700–950	10	—	50
BT 5–1	800–1000	8	20	40
OT 4-0	450–650	15	35	50
OT 4-1	550–750	12	30	45
OT 4	700–900	8	25	40
BT 20	950–1150	10	25	40
BT 6	900–1050	8	20	25
BT 14	900–1000	8	22	30
BT 16	850–950	14	60	50
BT 23	1000–1150	10	30	35
BT 22	1050–1300	8	20	25
BT 30	700–750	30	—	—
BT 32	850–900	20	—	—
BT 35	800–900	15	—	—

Таблица 48

Механические свойства ($\alpha+\beta$) и β -титановых деформируе-

мых сплавов после закалки и старения

Сплав	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²
		Не менее		
BT 6	1050–1150	7	—	—
BT 14	1080–1250	6	—	—
BT 16	1050–1200	14	50	—
BT 23	1200–1300	8	20	25
BT 22	1200–1350	5	25	—
BT 30	1200–1400	8	—	—
BT 32	1200–1300	8	—	—
BT 35	1200–1400	6	—	—

Для титана и его сплавов применяют в основном следующие виды термической обработки: отжиг (450–650 °С – неполный; 800–950 °С – полный), закалку (~ 850 °С), старение (500–600 °С), азотирование (900 °С – 50 ч) и термомеханическую обработку.

Литейные титановые сплавы. Плавка и заливка титановых сплавов ведется в вакууме, заливка может производиться в графитовые, корундовые и магнезитовые формы.

Литейные свойства титана и его сплавов достаточно высоки. Их линейная усадка невелика (~ 1%).

Сплавы имеют высокую жидкотекучесть.

Для фасонного литья применяют титан и его сплавы: BT1Л, BT5Л, BT14Л, BT6Л, BT9Л, BT20Л, BT35Л, которые по составу практически совпадают с аналогичными деформируемыми сплавами, табл. 49.

Таблица 49

Средний химический состав и механические свойства литейных титановых сплавов

Марка сплава	Химический состав (Ti – основа), %				Механические свойства		
	Al	Mo	V	Прочие элементы	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²
BT1Л	—	—	—	—	350	10	50
BT5Л	5	—	—	—	700	6	30
BT6Л	6	—	4	—	900	5	28
BT9Л	6,5	3,3	—	0,3Si; 1,5Zr	930	4	23
BT29Л	6,5	1,5	1,5	2,0 Zr	900	5	23
BT35Л	3	—	15	3Sn; 3Cr	1100	7–10	—

BT21Л	6,5	1,5	1,5	0,25Si; 1Cr; 2Zr	1000	4	21
-------	-----	-----	-----	------------------	------	---	----

В литейных сплавах допускается большее содержание примесей по сравнению с деформированными сплавами.

Наиболее широко используют α -сплав BT5Л, что обусловлено высокими литейными свойствами, простотой технологии получения из него отливок, распространенностью и недефицитностью единственного в нем легирующего элемента – алюминия, удовлетворительной пластичностью и ударной вязкостью отливок, более высокой циклической выносливостью по сравнению с титаном и литейными $\alpha+\beta$ -сплавами. Структура сплава BT5Л представлена в основном пластинчатыми зернами α -фазы внутри исходного β -зерна. Сплав не склонен к образованию горячих трещин, хорошо сваривается. Сплав предназначен для фасонных отливок, длительно работающих при температуре до 400°C. Его применяют также для создания сложных листосварных конструкций с повышенной надежностью в эксплуатации. Отливки из α -сплава BT5Л, как правило, подвергают полному или неполному отжигу для стабилизации структуры и снятия остаточных напряжений.



Рисунок 125. Ракета у входа в Выставочный комплекс ВДНХ. Титан. Москва (1). Скульптурно-архитектурный ансамбль «Брестская крепость». Над обширным пространством доминирует штык-obelisk (цельносварная металлоконструкция, облицованная титаном; высота 100 м, вес 620 т. (2)

Инженерное художественное материаловедение



Рисунок 126. С.Б. Ракитянский. Скульптура Варан. (а).
Набор 37 предметов в футляре с покрытием нитридом титана с художественной росписью "Золотая рыбка".

Применение титановых сплавов. Титановые сплавы применяются:

1. В авиастроении, вертолетостроении, ракетостроении и космической технике, станкостроении и в легкой промышленности.
2. В химической, нефтехимической, металлургической, целлюлозно-бумажной промышленности.
3. В красильном и полиграфическом производствах.
4. В пищевой, фармацевтической, микробиологической отраслях.
5. В вооружении, рис.128.
6. В паровых турбинах, теплообменной и опреснительной технике, в системах очистки.
7. В медицине: ортопедия, стоматология, травматология.
8. Для оборудования нефте- и газодобывающих платформ, газо-термальной энергетики, при захоронении радиоактивных отходов.
9. В судостроении, в добыче рыбы.
10. В производстве транспорта: автомобилестроении, железнодорожном транспорте, велосипедостроении.
11. В строительстве и архитектуре.
12. В обеспечении жизнедеятельности людей: ювелирное дело [36], изделия музыкального и изобразительного искусства, спорттовары, товары народного потребления, рис. 126.
13. Монументы, художественные изделия, рис. 125.



Рисунок 127. Памятник Ю.А. Гагарину. Титан, Москва

Первую художественную отливку из титана изготовили в 1961г. под руководством профессора О.Н. Магницкого. Это был сувенирный вариант копии Медного всадника. Восковые модели сделали на заводе "Монументскульптура". В качестве огнеупорного материала керамических форм выбрали электрокорунд, который в минимальной степени взаимодействует с титаном и обеспечивает хорошее качество литой поверхности. Дальнейшее освоение промышленного производства титановых сплавов показало, что они могут с успехом анодироваться. Цвет и интенсивность получаемых покрытий определяются положительноостью травления. Высокие декоративные свойства и коррозионная стойкость позволили использовать титан в качестве материала для памятников, монументов, обелисков.

Первой в мировой практике монументальной литой скульптурой из титана является памятник Юрию Гагарину на площади его имени в Москве, рис. 127. Фигура Гагарина высотой 14 м изготовлена из 239 блоков. Размеры литых блоков выбраны исходя из технологических возможностей вакуумного литейного оборудования. Формы изготавливали из графитовой смеси методом кусковой формовки. Плавка производилась в гарнисажных печах с тиглями вместимостью 400 кг. Отдельные блоки соединяли между собой болтами, изготовленными также из титанового сплава. Руководил выполнением всего комплекса сложных технологических процессов профессор Г.Л. Ходоровский.

ВМФ решил вернуть в строй уникальные титановые подлодки. Главкомат ВМФ России принял решение провести ремонт и

модернизацию атомных подводных лодок проектов 945 «Барракуда» и 945А «Кондор». Эти корабли строились в 1980–1990-х годах из титана, обладающего большей прочностью по сравнению с традиционной сталью.



Рисунок 128. Титановые корпуса подводных лодок проектов 945 «Барракуда» и 945А «Кондор»;

Корабли проекта 945 строились в СССР в 1979–1986 годах. Сейчас в составе флота четыре титановые атомные подводные лодки (если не считать мини-лодок для глубоководных исследований): две проекта 945 «Барракуда» – К-239 «Карп» и К-276 «Кострома» и две титановые лодки модернизированного проекта 945А «Кондор» – К-336 «Псков» и К-534 «Нижний Новгород». Главная мишень «Барракуд» и «Кондоров» – авианосцы и подводные лодки. Для их уничтожения используются торпеды, которые выстреливают из двух 650-миллиметровых торпедных аппаратов и четырех 533-миллиметровых. В отличие от «Барракуд», «Кондоры» могут стрелять ядерными крылатыми ракетами «Гранат» и погружаться на 50 м глубже – до 600 м. От воздушных атак лодки могут отстреливаться зенитными ракетами «Игла». Несмотря на возраст, корпуса титановых лодок «в отличном состоянии». Титан, в отличие от стали, не подвержен коррозии и лодки могут служить до 100 лет.

ГЛАВА 11. МЕДЬ И ЕЕ СПЛАВЫ

11.1 Медь

Медь – металл розовато-красного цвета, пластичный, хорошо проводит теплоту и электричество, с плотностью 8,94

г/см³ и температурой плавления 1083(1084) °С. Кристаллическая решётка гранецентрированная кубическая К12 с периодом $a=0,36074$ нм без полиморфных превращений. На воздухе при наличии влаги и углекислого газа медь медленно покрывается плёнкой зеленовато-коричневого цвета карбоната гидроокиси меди $(\text{CuOH})_2\text{CO}_3$ - патиной.



Рисунок 129. Медь - пластичный металл золотисто-розового цвета: 1 - самородок, 2 – излом слитка

В химическом отношении медь является малоактивным металлом, однако с галогенами (F, Cl, Br, Y, At) она реагирует уже при комнатной температуре, например, с влажным хлором образует хлорид CuCl_2 . При нагревании медь взаимодействует и с серой, образуя сульфид Cu_2S . Соляная и разбавленная серная кислота на медь не действуют. Летучие соединения меди окрашивают пламя газовой горелки в сине-зелёный цвет.

Ввиду высокой теплопроводности, электрической проводимости, ковкости, хороших литейных свойств, большого сопротивления на разрыв и химической стойкости медь широко используется в промышленности. Большое количество меди идет на изготовление проводов и кабелей, на изготовление различной аппаратуры.

В зависимости от чистоты медь изготавливают следующих марок: М00 (99,99 % Cu), М0 (99,95 % Cu), М1 (99,90 % Cu), М2 (99,70 % Cu), М3 (99,50 % Cu) – ГОСТ 859-2001.

Присутствующие в меди примеси оказывают большое влияние на её свойства. По характеру взаимодействия примесей с медью их можно разделить на следующие группы:

1. Примеси, образующие с медью твёрдые растворы: Ni, Zn,

Sb, Sn, Al, Te, P и др. Они повышают прочностные и снижают пластические свойства.

2. Нерастворимые примеси (Pb, Bi и др.) образуют легкоплавкие эвтектики и включения, снижают механические, особенно пластические свойства.

3. Кислород и сера образуют хрупкие химические соединения Cu_2O , CuO и Cu_2S . Кислород, присутствующий в меди, образует закись меди и вызывает «водородную болезнь». При нагреве меди в атмосфере, содержащей водород, происходит его диффузия в глубь меди. Если в меди присутствуют включения Cu_2O , то они реагируют с водородом, в результате чего образуются пары воды по реакции $\text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2 = 2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}$, протекающей с увеличением объёма. Это создаёт в отдельных участках металла высокое давление и вызывает появление микротрещин, которые могут привести к разрушению металла. Механические свойства технической меди приведены в табл. 50.

Таблица 50

Механические свойства технической меди (ГОСТ 859-2001)

Состояние при поставке	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %
Литая	150-200	15-25
Прокатанная и отожжённая	260-270	40-50
Нагартованная	400-470	1-2

Медь и её сплавы имеют удовлетворительную технологичность. Медь хорошо деформируется, хорошо сваривается и паяется [29]. Её недостатком является сравнительно плохая обрабатываемость резанием.

Использование меди. В художественной промышленности из меди производят изделия методом штамповки, дифовки и чеканки. Она легко принимает самую разнообразную форму, допускает выколотку высокого рельефа, рис. 130.

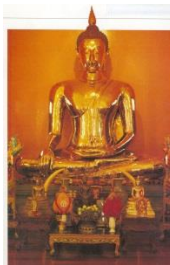


Рисунок 130. Медный барельеф Будды – символ суверенитета Шри Ланки

Методом волочения можно получить проволоку диаметром до 0,02 мм. Из меди, как и из золота и серебра, можно легко изготавливать тончайшие филигранные изделия.

Медь хорошо подвергается шлифовке и полировке, но плохо пилится напильником, также плохо точится, сверлится и фрезеруется.

Применение чистой меди во многих случаях обуславливается ее исключительно высокой пластичностью и вязкостью, позволяющей из листов сравнительно небольшой толщины (0,8-1,2 мм) получать путем выколотки сложные объемные формы. Знаменитая американская статуя Свободы, рис.5, высотой 46 м и весом 205 т, созданная французским скульптором Бартольди и инженером Эйфелем, имеет внешнюю видимую оболочку из меди толщиной 2,4 мм. Таким же методом изготовлена огромная статуя Христа Спасителя в Бразилии, рис.131.



1



2



3

Рисунок 131. Статуя Свободы. 1886год, США(1); статуя Спасителя. 1931год, Бразилия(2,3)

Листовой медью покрывали крыши замков, монастырей и других зданий, рис.132.



Рисунок 132. Дворец Сансуси в Подсдаме, Германия. Крыша купола дворца покрыта листовой медью

Эти свойства чистой меди (в основном пластичность и антикоррозийность) сделали ее основным материалом для дифовочных работ при изготовлении крупных скульптурных и орнаментальных композиций для интерьера, рис. 133. Медь хорошо спаивается мягкими и твердыми припоями, хорошо серебрится и золотится; эмаль, нанесенная на медь, хорошо держится, не трескается и не отскакивает.

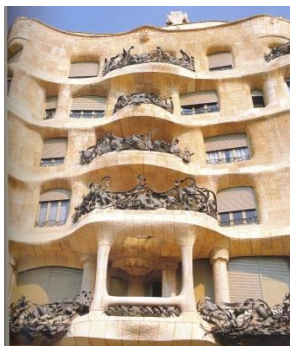


Рисунок 133. Дом Каса Мила Антонио Гауди. Причудливые кованные решетки выполнены по его эскизам. Барселона, Испания

Медь является прекрасным материалом для выполнения гравюр. Непревзойденным мастером выполнения гравюр по меди является основоположник немецкого искусства Возрождения Альбрехт Дюрер (1471-1528 гг.), рис.134.



Рисунок 134. Альбрехт Дюрер (1471-1528). Автопортрет, гравюра на меди (1); «Всадник, смерть и дьявол» (2)

Из трех гравюр «Всадник, смерть и дьявол» (1513), «Св. Иероним» и «Меланхолия» (1514), знаменующих вершину его творчества, где маленький лист станковой гравюры трактуется как большое монументальное произведение искусства, здесь приводится только первый лист: «Всадник, смерть и дьявол». Одетый в кольчугу и шлем, вооруженный мечом и копьем, сильный и спо-

койный всадник едет на мощном коне, не обращая внимания на уродливого дьявола, который силится удержать его коня, на страшную смерть, показывающую ему символ времени – песочные часы, на то, что под ногами лошади, на земле, лежит человеческий череп. Поступь коня неустойчива и уверенна, лицо человека исполнено воли и внутренней сосредоточенности, рис.134.

В декоративно-прикладном и ювелирном производстве медь использовалась в качестве материалов для изготовления разнообразных изделий. На рис.135-136 показаны изделия прикладного назначения.



Рисунок 135. Самовар-чайник. Середина XIX в. Россия. Медь, Ростовский-на-Дону краеведческий музей (1) . Вазочка с птицей Сириин. На медной патинированной вазе изображена сидящая мифическая птица Сириин в виде полуобнаженной женской фигуры в кокошнике, с расправленными крыльями (2).

Фирма Фаберже, 1908-1917 гг.



Рисунок 136. Три памятных тарелки. Серебро, латунь, медь (левая сверху) (1); медная кастрюля (2). Фирма Фаберже, 1914 г.

Медь хорошо плакируется (покрывается) методом совместной горячей прокатки серебром. Из плакированного относительно дешевого по сравнению с чистым серебром материала выделялись красивые разнообразные изделия.

В конце XIX – начале XX вв. в технике накладного серебра работала в Варшаве фирма «Фраже» – «новое серебро» – такое название получили многообразные предметы сервировки стола: вазы, яйцеварки, сахарницы самых немыслимых конфигураций, солонки и перечницы, столовые приборы, совочки для уборки со стола хлебных крошек, рис.137(1).

Из водного раствора медного купороса $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ методом гальванопластики из практически чистой меди получают художественные изделия, в частности, медали, рис.137(2).



1



2

Рисунок 137. Ваза. Нач. XX. Россия. Фраже. Ростовский-на-Дону краеведческий музей(1); Медная медаль в честь договора князя Игоря с греками. Конец XVIII в. Музей исторических драгоценностей Украины (2)

В чистом виде медь для отливок применяется сравнительно редко, рис.138.



Рисунок 138. Крест. Кон. XIX в. Россия. Медь. Литье. Ростовский-на-Дону краеведческий музей (1); Медное художественное литье XI - начала XX века, (2)

Для отливок используются сплавы меди с оловом и другими компонентами (Al, Si, Mn, Pb, Fe и пр.), называемые бронзами, и сплавы меди с цинком, называемые латунями.

Технические свойства и режимы обработки меди:

Температура литья, оС	1150-1230
Температура горячей обработки, оС:	
- прессование	800-950
- прокатка	820-860
Температура отжига, оС	500-700
Температура рекристаллизации, оС	180-230
Линейная усадка (литьё в кокиль), %	2,1
Жидкотекучесть (литьё в песчаную форму), см	35
Защитный покров при плавке	древесный уголь.

По технологическим свойствам различают деформируемые и литейные сплавы; по химическому составу их делят на латуни, бронзы и медно-никелевые сплавы.

Медные сплавы обозначаются начальной буквой сплава Л – латуни, Бр – бронзы, МН – медноникелевые, после чего следуют буквы основных элементов, образующих сплав: О – олово, Ц – цинк, Мц – марганец, А – алюминий, Ж – железо, Ф – фосфор, Б – бериллий, Х – хром, Н – никель и т. д., после них цифры, указывающие содержание легирующих элементов в процентах. В де-

формируемых латунях не указывается содержание цинка, а в деформируемых бронзах и медноникелевых сплавах - содержание меди, их концентрации определяются по разности. Например, ЛМцА57-3-1 - латунь, содержащая, %: 57 Cu, 3 Mn, 1 Al и остальное – цинк, или БрАЖН10-4-4 – бронза, %: 10 Al, 4 Fe, 4 Ni и МНЖМц30-1-1 – мельхиор, %: 30 Ni, 1 Fe, 1 Mn, остальное – медь.

Порядок цифр в обозначениях марок деформируемых и литейных сплавов различен. В марках деформируемых латуней, бронз и медноникелевых сплавов цифры, отделённые друг от друга дефисом, ставятся в конце обозначения и расположены в той же последовательности, что и буквы, например, ЛАН59-3-2; БрОФ6,5-0,15; МНЦС16-29-1,8.

В литейных латунях и бронзах содержание всех компонентов сплавов – в процентах, в том числе содержание цинка, приведённые сразу же после обозначающих букв. Содержание меди в литейных сплавах определяется по разности от 100%. Например, ЛЦ23А6ЖЗМц2 – литейная латунь, содержащая 23% Zn, 6% Al, 3% Fe и 2% Mn и БрОЗЦ7С5Н1 – литейная бронза, содержащая 3% Sn, 7% Zn, 5% Pb и 1% Ni, остальное – медь.

11.2. Латунь

Сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк, называются латунями. Двойные сплавы в системе Cu–Zn называются простыми латунями, а с добавлением других вспомогательных и модифицирующих элементов называются сложными латунями. Сплавы с содержанием от 3 до 12% Zn называются томпаком, от 12 до 20% – полутомпаком, а свыше 20% – латунями. Для улучшения механических и технологических свойств и коррозионной стойкости латуни дополнительно подвергают легированию Ni, Mn, Sn, Pb, Si, Fe и другими элементами. На рис. 139 представлена диаграмма состояния Cu–Zn.

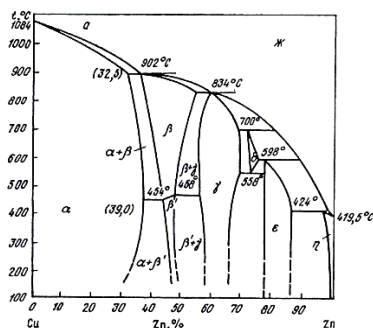


Рисунок 139. Диаграмма состояния Cu–Zn

В этой системе в твёрдом состоянии образуются следующие фазы:

α -твёрдый раствор замещения Zn в Cu (α -латунь). При кристаллизации при 903 °C растворимость Zn в Cu (Cr) составляет 32,5 %, увеличивается с понижением температуры до 454 °C до 39% и с понижением температуры до комнатной температуры растворимость снижается до 35 %. Решётка α -латуни K12;

β -твёрдый раствор в системе Cu–Zn со связью электронного типа, имеющий решётку K8. При охлаждении в интервале температур 454–4680C неупорядоченный твёрдый раствор β переходит в упорядоченный твёрдый раствор β' ;

γ -твёрдый раствор на основе Cu₅Zn₈ со связью электронного типа, имеющий решётку K12. При охлаждении при температуре 270 оC неупорядоченный раствор γ превращается в упорядоченный γ' ;

ϵ -твёрдый раствор на основе CuZn₃ со связью электронного типа, имеющий решётку Г12;

δ -твёрдый раствор, природа химического соединения пока не установлена;

η -твёрдый раствор Cu в Zn (Г12).

По структуре сплавы системы Cu–Zn разделяют на α -, ($\alpha+\beta$) и β -латуни.

Латуни со структурой α -фазы пластичны, имеют высокую технологичность и легко поддаются горячей и холодной обработке давлением; отлично ведут себя при сварке, пайке, лужении. Механические свойства этой латуни в отожжённом состоянии следующие: $\sigma_B=250\text{--}400$ МПа, $\delta=55\text{--}65$ %, HB=30–60. Прочность и твёрдость α -латуни можно повысить нагартовкой.

α + β -латуни обладают большой твёрдостью и меньшей пластичностью. Они подвергаются горячей обработке давлением при температуре 750–850 °С.

β -латуни при комнатной температуре очень мало пластичны, и при содержании около 50% Zn и более они не поддаются холодной обработке давлением. Поэтому в промышленном масштабе применяются лишь α - и (α + β)-латуни. β -латуни могут представлять интерес как материал с высоким пределом упругости ("сверхупругости").

Деформируемые латуни. Наиболее широко применяют двойные латуни марок Л90, Л68, Л63 (табл. 51).

Латунь Л90 (томпак) обладает высокой стойкостью против коррозии, имеет красивый золотистый цвет, в связи с чем её применяют для изготовления знаков различия и фурнитуры. Латунь Л68 называют патронной, из неё изготавливают изделия холодной штамповкой и глубокой вытяжкой, в частности гильзы патронов. Латунь Л63 называют торговой, так как она среди всех латуней занимает первое место по объёму производства. Отрицательное свойство латуней – это самопроизвольное растрескивание во влажной атмосфере, особенно изделий, подвергнутых наклёпу. Наклёп можно устранить отжигом при температуре 300–400 °С в течение 1 часа.

Латуни широко используются в художественной промышленности. Из латуни римляне чеканили монеты, изготавливали памятные доски. К I в. н.э. латунь получила широкое распространение. Из латуни методом чеканки и выколотки получали различную утварь: её инкрустировали, гравировали, покрывали эмалью.

В XVIII в. широкое распространение получили голландские латунные чайники. Томпак, прокатанный в тонкую фольгу, имитирующую золотой лист, называли голландским металлом или голландским золотом.

В декоративно-прикладном искусстве мусульманских стран Ближнего Востока широко использовалась латунь. Для ритуальных церемоний мусульмане создали многочисленные предметы, которые по праву считаются произведениями искусства. Для хранения Корана делали курсий, представляющий собой столик-ларец. Курсий делали из латуни, инкрустировали серебром и покрывали гравировкой, рис. 140.



Рисунок 140. Исламский курсий (1) и чаша для омовения (2), XIV век

Из сложных латуней следует остановиться на латуни ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5, которая может подвергаться дисперсионному упрочнению. Дисперсионное упрочнение обеспечивают соединения на основе Si, Ni и Mn, обладающие в меди переменной растворимостью. В закаленном состоянии эта латунь отличается высокой пластичностью ($\sigma_{\text{в}} = 100 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 224 \text{ МПа}$, $\delta = 48 \%$, $\psi = 61 \%$), а после старения приобретает высокую прочность ($\sigma_{\text{в}} = 700 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 466 \text{ МПа}$, $\delta = 25 \%$, $\psi = 41 \%$). Ещё более высокие упругие и прочностные свойства достигаются при старении этой латуни после деформации в закаленном состоянии (НТМО): $\sigma_{\text{в}} = 1030 \text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} = 1010 \text{ МПа}$, $\delta = 3,5 \%$, $\psi = 11 \%$.

Прочностные свойства латуней можно существенно повысить нагартовкой. Временное сопротивление разрыву при наклёпе увеличивается до 250–300 МПа.

Таблица 51

Химический состав деформируемых латуней (ГОСТ 15527–2004)

Марка	Структура	Химический состав (основа Cu), %	
		Cu	

Л96	α	95,0-97,0	
Л90	α	88,0-91,0	
Л85	α	84,0-86,0	
Л80	α	79,0-81,0	
Л70	α	69,0-72,0	
Л68	α	67,0-70,0	
Л63	α	62,0-65,0	
Л60	$\alpha + \beta$	59,0-62,0	
ЛА77-2	α	76,0-79,0	1,7-2,5 Al
ЛАЖ60-1-1	$\alpha + \beta$	58,0-61,0	0,75-1,5 Fe; 0,1-0,6 Al
ЛАН59-3-2	$\alpha + \beta$	57,0-60,0	2,5-3,5 Al; 2,0-3,0 Ni
ЛЖМц59-1-1	$\alpha + \beta$	57,0-60,0	0,6-1,2 Fe; 0,5-0,8 Mn; 0,1-0,4 Al; 0,3-0,7 Sn
ЛН65-5	α	64,0-67,0	5,0-6,5 Ni
ЛМц58-2	$\alpha + \beta$	57,0-60,0	1,0-2,0 Mn
ЛМцА57-3-1	$\alpha + \beta$	55,0-58,5	2,5-3,5 Mn; 0,5-1,5 Al
ЛС63-3	α	62,0-65,0	2,4-3,0 Pb
ЛС74-3	α	72,0-75,0	2,4-3,0 Pb
ЛЖС58-1-1	$\alpha + \beta$	56,0-58,0	0,7-1,3 Pb; 0,7-1,3 Fe
ЛК80-3	$\alpha + \beta$	79,0-81,0	2,5-4,0 Si

ЛМш68-0,05	α	67,0-70,0	0,025-0,06 As
ЛАМш77-2-0,05	α	76,0-79,0	1,7-2,5 Al; 0,025-0,06 As
ЛАНКМц75-2-2,5-0,5-0,5	α	73,0-76,0	0,3-0,7 Mn; 1,6-2,2 Al; 0,3-0,7 Si; 2,0-3,0 Ni

Основная термическая обработка латуней – отжиг, который проводят для смягчения материала перед дальнейшей обработкой давлением; температура нагрева под отжиг составляет 600-700°C. Назначение латуней приведено в табл. 52, 53.

Таблица 52

Двойные деформируемые латуни

Марка	Область применения
Л96, Л90	Детали машин, приборов теплотехнической и химической аппаратуры, змеевики, сильфоны, значки, медальоны и др.
Л85	Детали машин, приборов теплотехнической и химической аппаратуры, змеевики, сильфоны, художественные изделия и др.
Л80	Детали машин, приборов теплотехнической и химической аппаратуры, змеевики, сильфоны художественные изделия и др.
Л70	Гильзы химической аппаратуры, отдельные штампованные изделия
Л68	Большинство штампованных изделий
Л63	Гайки, болты, детали автомобилей, конденсаторные трубы
Л60	Толстостенные патрубки, гайки, детали машин.

Таблица 53

Многокомпонентные деформируемые латуни

Марка	Область применения
ЛА77-2	Конденсаторные трубы морских судов

Инженерное художественное материаловедение

1	ЛАЖ60-1-	Детали морских судов.
2	ЛАН59-3-	Детали химической аппаратуры, электро-машин, морских судов
1-1	ЛЖМа59-	Вкладыши подшипников, детали самолетов, морских судов
	ЛН65-5	Манометрические и конденсаторные трубки
	ЛМц58- 2	Гайки, болты, арматура, детали машин
3-1	ЛМцА57-	Детали морских и речных судов
	ЛО90-1	Конденсаторные трубы теплотехнической аппаратуры
	ЛО70-1	Конденсаторные трубы теплотехнической аппаратуры
	ЛО62-1	Конденсаторные трубы теплотехнической аппаратуры
	ЛО60-1	Конденсаторные трубы теплотехнической аппаратуры
	ЛС63-3	Детали часов, втулки
	ЛС74-3	Детали часов, втулки
	ЛС64-2	Полиграфические матрицы
	ЛС60-1	Гайки, болты, зубчатые колеса, втулки
	ЛС59-1	Гайки, болты, зубчатые колеса, втулки
1	ЛЖС58-1-	Детали, изготавливаемые резанием
	ЛК80-3	Коррозионностойкие детали машин
0,05	ЛМш68-	Конденсаторные трубы
5- 2- 0,5	ЛАНКМц7	Пружины, манометрические трубы

Литейные латуни. Сплавы Cu–Zn являются узкоинтервальными ($\Delta t_{кр}=50–60$ оС). Латуни имеют хорошую жидкотекучесть, дают плотные отливки с небольшой пористостью и значительной

сосредоточенной усадочной раковины [35]. Латунь склонна к образованию столбчатой структуры. Комплексное легирование литейных латуней позволяет существенно улучшить их механические и литейные свойства (табл. 54).

Таблица 54

Механические и литейные свойства латуни (ГОСТ 17711–93)

Марка	Средний химический состав, %		Механические свойства			Литейные свойства	
	Cu	Легирующие элементы	σ_B , МПа	δ , %	HB	$l_{ж}$, см	ϵ , %
ЛЦ40С	59	40Zn; 1Pb	215	20	80	30	1,8
ЛЦ25С2	73	25Zn; 2Pb	146	8	60	—	—
ЛЦ38Мц2С2	58	38Zn; 2Mn; 2Pb	343	10	85	40	2,1
ЛЦ40Мц1,5	58,5	40Zn; 1,5Mn	392	20	110	—	—
ЛЦ40Мц3А	56	40Zn; 3Mn; 1Al	441	15	115	35	1,8
ЛЦ40Мц3Ж	56	40Zn; 3Mn; 1Fe	490	10	100	30	1,5
ЛЦ30А3	67	30Zn; 3Al	392	15	90	57	1,3
ЛЦ23А6Ж3Мц2	66	23Zn; 6Al; 3Fe; 2Mn	705	7	165	47	1,8
ЛЦ16К4	80	16Zn; 4Si	343	15	110	60	1,8

Примечание. Механические свойства указаны для отливок в кокиль; при литье в песчаные формы σ_B на 20–100 МПа ниже.

В литейных латунях допускается больше примесей, чем в деформируемых, по следующим причинам:

а) при фасонном литье нет необходимости обеспечивать высокую деформируемость;

б) многие литейные латуни готовят из лома и отходов.

Назначение литейных латуней и ювелирных сплавов показано в табл. 55.

Таблица 55

Литейные латуни

Марка Область применения

ЛЦ16К4 Детали арматуры

Инженерное художественное материаловедение

ЖЗЖ	ЛЦ23А6	Массивные червячные винты, гайки нажим-
	ЖЗМц2	ных винтов
	ЛЦ30А3	Коррозионно-стойкие детали
	ЛЦ40С	Литые детали арматуры, втулки, сепарато-
		ры, подшипники, художественное литье
ЗЖ	ЛЦ40Мц	Детали ответственного назначения, работа-
		ющие при температуре до 300 °С
	ЛЦ25С2	Штуцера гидросистемы автомобилей

Ювелирные сплавы

Вид об- работки	Цвет	Наименование сплава
литьё	жёл- тый	Латунь в гранулах М67/33
литьё	зе- лёный	Латунь в гранулах М60/40
литьё	зо- лотистый	Латунь в гранулах М75/25
литьё	жёл- тый	Латунь в гранулах М90

На Руси предпочитали из латуни отливать художественные изделия [40] взамен классическим античным бронзам из-за лучшей жидкотекучести, малого интервала кристаллизации и меньшей стоимости; при этом учитывалось снижение декоративной привлекательности и меньшая коррозионная стойкость. Рассмотрим историю создания замечательного литейного памятника Минину и Пожарскому. Автором скульптурной композиции являлся талантливый русский ваятель И.П. Мартос, а отливку цельнолитой скульптуры высотой 4,7 м осуществил выдающийся литейщик В.П. Екимов. В этой композиции отдельно отливали щит, шлем и нижнюю часть меча, рис. 141. Вопреки мнению скульптора Мартоса, считавшего, что для отливки статуи необходимо использовать античную бронзу, какую применили для Медного всадника, Екимов использовал сплав следующего состава: 13-14% Zn, 0,7-0,8% Sn, 0,2-0,4% Pb, 0,3-0,8% Fe и небольшие примеси никеля и серебра. За участие в создании этого уникального памятника В.П.

Екимов был награжден орденом святой Анны II степени.

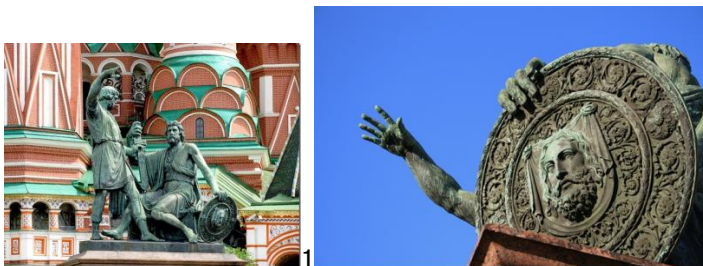


Рисунок 141. Памятник Минину и Пожарскому. Латунь. 1818 г. В.П. Екимов и И.П. Мартос (1) и фрагменты, которые отливались отдельно (2)

Краткие сведения об истории создания памятника

Памятник «Гражданину Минину и князю Пожарскому благодарная Россия. Лета 1818» в истории России и Москвы является первым скульптурным монументом, увековечившим подвиг всего русского народа в борьбе за независимость Отечества. Данному объекту культурного наследия принадлежит исключительное место в истории российской и мировой культуры как величайшему произведению монументальной пластики и литейного мастерства начала XIX века.

Идея создания монумента спасителям Отечества зародилась в начале XIX столетия. Большое собрание Академии художеств, определявшее характер архитектурной и художественной деятельности в конце 1802г., в программе для скульпторов в числе первых «достойнейших к исполнению» назвало «героические подвиги и патриотические добродетели Кузьмы Минина и князя Пожарского». Просветительская организация «Вольное общество любителей словесности, наук и художеств» в начале 1803г. призвала «общество начертать проект для сооружения памятника Пожарскому, Минину и Гермогену» для Москвы за счет добровольного пожертвования граждан. Скульптор Иван Петрович Мартос, адъюнкт-ректор скульптурного класса Академии художеств, откликнулся на эти предложения. В 1804г. И.П. Мартос выставил на суд публики свою первую модель памятника Ми-

нину и Пожарскому из глины.

Нижегородцы, земляки Кузьмы Минина Сухорука, решили увековечить его память на родине в виде обелиска из мрамора и в 1808г. обратились к правительству с прошением открыть подписку на сбор средств для памятника. Совет Академии художеств поручил подготовить проекты памятника Минину и Пожарскому для Нижнего Новгорода выдающимся мастерам XIX века скульпторам И.П. Мартосу, Ф.Ф. Щедрину, И.П., Прокофьеву, В.И. Демут-Малиновскому и С.С. Пименову и архитекторам А.Д. Захарову, А.Н. Воронихину, Тому де Томону, А.А. Михайлову (старшему) и А.А. Михайлову (младшему). В 1808г. из представленных конкурсных проектов и моделей был удостоен Высочайшего одобрения вариант И.П. Мартоса «Проект монумента в честь Минина и Пожарского». Во всех губерниях России с января 1809г. была открыта подписка «на сооружение памятника гражданину Минину и князю Пожарскому в Нижнем Новгороде по программе адъюнкт-ректора Академии художеств статского советника Мартоса». К 1811г. сумма сбора достигла 136 тысяч рублей, из которых 18 тысяч были присланы из нижегородской губернии. И.П. Мартос обратился с предложением поставить монумент в Москве и с просьбой начать работу над памятником.

К 1813г. было принято окончательное решение установить памятник в Москве. Место для памятника выбрал сам И.П. Мартос в центре площади перед портиком Торговых рядов. Первый скульптурный монумент Москвы вместе с собором Василия Блаженного, воздвигнутым в честь покорения Казанского ханства, и Казанским собором, построенным по заказу Д.П. Пожарского в честь победы над польскими интервентами, должен был еще больше подчеркнуть идейно-мемориальное значение древней площади города. Композиция памятника, рассчитанная на раскрытие его содержания – призыв русского народа 200 лет назад к защите отечества от иноземных захватчиков, хорошо увязывалась с архитектурно планировочной средой Красной площади.

Подобно Торговым рядам, памятник имел главную — фронтальную точку зрения, соответствующую центральной оси фонового здания. Закрепляя поперечную ось площади, он еще больше усилил пространственную связь Торговых рядов с Кремлем.

В 1815г. И.П. Мартос закончил большую модель памятника Минину и Пожарскому, которая имела исключительный успех у публики и удостоилась одобрения правительства. Соору-

жение памятника Минину и Пожарскому сделалось общенародным событием, большая часть средств на оплату расходов, связанных с отливкой скульптурной группы и барельефов, была собрана всенародной подпиской. В изготовлении монумента вместе с И.П. Мартосом принимали участие скульпторы И.Т. Тимофеев, С.И. Гальберг, С.К. Суханов, архитектор А.И. Мельников, литейщик В.П. Екимов, многие русские мастера и подмастерья, имена которых затерялись в истории.

В изготовлении модели И.П. Мартосу помогал скульптор И. Т. Тимофеев «особенно вспомоществовал своими трудами и прилежанием при делании большой модели из глины и при делании форм с малой модели эбошировал большую». Он «должен был поднимать тяжести, передвигать подмостки, груды глины и прочих материалов и для содержания во всегдашней влажности глины смачивать большую группу от самого начала до окончания оной в течение более двух лет ежедневно». С.И. Гальберг выполнил профильный портрет своего учителя для фасадного барельефа. На барельефе И.П. Мартос изображен с двумя сыновьями, которые трагически погибли в военной компании 1812 года.

Из архивных материалов известны следующие факты и особенности технологии отливки элементов монумента. Для отливки скульптурной группы в металле В.П. Екимов соорудил в литейной мастерской Академии художеств особый фундамент с 16 печами. Сохранился чертеж схемы литниковой системы отливки. Сверху на железной решетке были помещены отлитые из воска плинт и фигуры Минина и Пожарского, укрепленные толстыми железными полосами. Над ними был сделан восковой бассейн, из которого во все стороны были проведены восковые каналы, имеющие около дюйма в диаметре. От них под острыми углами провели путцы, упиравшиеся одним концом в каналы, которые шли от бассейна, а другим — в восковые фигуры и плинт. От фигур отходили особые воздушные каналы. Вся поверхность восковых моделей снаружи была покрыта особой мастикой, состоящей из толченого кирпича, жидко разведенного на пиве. Мастику наносили слоями примерно 45 раз, каждый нанесенный слой просушивали с помощью опахал из больших перьев. Внутренность восковых фигур была наполнена составом из алебаstra и толченого кирпича — калидром. После этого «фигуры, наполненные внутри калидром, а снаружи покрытые мастикой, обложены кусками из сырой глины, что сделано и с плинтом, каналами, путцами и воздушниками, обведены кирпичною стеной, окованы снаружи полосным железом, а

внутри залиты калидром из алебастра и толченого кирпича». Для полного выжигания восковой модели в течение целого месяца топили 16 печей. Таким образом была подготовлена форма для заливки расплавленного металла. В присутствии многочисленных зрителей в литейной мастерской Академии художеств 5 августа 1816 г. производилась отливка группы и плинта. Для отливки было использовано: 1000 пудов штыковой меди, 10 пудов олова, 60 пудов шпиуатеру. По свидетельству очевидцев «страшно было смотреть, когда металл сей потек горящею и клокочущею рекою по сделанному для него каналу к бассейну, который сделан был над фигурами и из которого он должен был наполнять снизу все пространство, какое прежде занято было воском, и после выжжения воску оставалось пустым».

В рапорте министру внутренних дел Иван Петрович Мартос сообщал: «Медь плавилась 10-ть часов, течение продолжалось 9 минут благополучно, но после сего она пробилла внизу форму и выбежало 60 пудов... взятыми мерами она была остановлена и течение ее в форму продолжалось потом до конца... Через пять дней, когда металл остыл, после разбития формы оказалось, что монумент отлит совершенно». Отливка колоссальной скульптурной группы за один прием была уникальной литейной работой для России и Европы. Она свидетельствовала о высочайшем литейном искусстве русского мастера В. П. Екимова.

В 1815г. И.П. Мартос заключил контракт на работы по изготовлению гранитного постамента памятника с петербургским купцом Самсоном Сухановым, который имел опыт сложных строительного-монтажных работ, наиболее значимая из которых - сооружение гранитных колонн для Казанского собора. Гранитные блоки для постамента были изготовлены в Выборгской губернии, близ деревни Киркопеле на острове Сумар Кали. И.П. Мартос предположил облегчить вес постамента за счет изъятия изнутри двух третей камня. В изготовлении постамента памятника участвовал адъюнк-т-профессор Академии художеств архитектор А.И. Мельников, который «смотрел за строительством мастерской, делал рисунки и шаблоны для большого пьедестала и тщательно наблюдал за отделкой одного». В феврале 1817 г. была утверждена надпись на постаменте: «Гражданину Минину и князю Пожарскому благодарная Россия в лето 1817». Позже был изменен конец фразы надписи: «лета 1818» в связи с переносом даты открытия памятника, которое состоялось лишь в 1818г.. В мае 1817г. было решено «поставить монумент на Красной площади». Тогда

же состоялась отправка скульптурной группы и постамента из Петербурга в Москву водным путем по Мариинской системе. 3 сентября 1817г. части памятника прибыли к Краснохолмскому мосту на реке Москве.

Торжественное открытие памятника Минину и Пожарскому состоялось 20 февраля 1818г. и превратилось в крупнейшее событие культурной жизни страны. Монумент был первым памятником, установленным в разоренной французами столице.

Памятник занял наиболее высокую точку Красной Площади. Смысловое прочтение памятника было ярко подчеркнуто скульптурной композицией: стоящая во весь рост с простертой в сторону Кремля правой рукой фигура гражданина Минина «продавца мяса и рыбы», «выбранного от народа», призывает князя Пожарского встать на защиту веры и Отечества. В исторический момент Смутного времени вопрос сохранения православной веры и независимости Отечества был наиважнейшим вопросом, для решения которого необходимо было объединение всех слоев населения. Символично левой рукой гражданин Минин вручает князю Пожарскому меч – крест, который карает смуту, вероотступничество и стяжательство. Он объединяет народ, князя Пожарского и гражданина Минина встать за правое дело, защиту которого олицетворяет щит с образом Спаса Нерукотворного. Образ Спаса Нерукотворного был на стягах на Куликовом поле. Под этим образом Русь обрела единство и одолела завоевателей. Два барельефа, расположенные в нишах пьедестала памятника, отмечали основные этапы освободительной борьбы против иностранной интервенции и внутренних распрей. Барельеф фасадной стороны памятника рассказывал о событиях, связанных со сбором «десятой деньги» среди всех слоев населения на организацию народного ополчения. Барельеф на тыльной стороне символически раскрывал ратные подвиги ополчения под руководством князя Пожарского. Щит в руках одного из русских воинов на своем аверсе несет изображение иконы Казанской Божьей Матери, которая была обретаена в день освобождения Кремля от поляков и которой молились воины ополчения перед решающим штурмом.

Монумент притягивал внимание людей, ступивших на Красную Площадь, как со стороны Иверских ворот, так и со стороны Васильевского спуска. Пространство перед монументом было свободно от архитектурных форм, а между фасадом Гостиного двора и тыльной стороной памятника был проход, позволявший публике обозреть его со всех сторон. Фасадной частью памятник

был обращен к Кремлю. В сознании граждан России Москва и Кремль едины и олицетворяют сердце Отечества и святыни духовного и материального характера.

За прошедшие годы монумент пришел в аварийное состояние.

Мнение участников комиссии по исследованию состояния памятника. Доцент кафедры «Технология металлов» Московского государственного строительного университета, к.т.н. Кучеров В. И., один из членов комиссии по обследованию состояния памятника, отмечает: «Задний барельеф памятника "Минину и Пожарскому" весьма серьезно поражен коррозией и трещинами. Полностью ликвидировать эти многочисленные трещины реставрацией невозможно, их можно лишь замаскировать. При дальнейшем экспонировании барельефа даже небольшие циклические термические напряжения от воздействия прямых солнечных лучей или изменения погоды способны привести к развитию существующих трещин, увеличению их размеров. Поэтому, не только задний барельеф, но и все остальные литые компоненты памятника "Минину и Пожарскому" требуют пристального к себе внимания, постоянного наблюдения за их состоянием».

Мнение еще одного из участников комиссии по обследованию памятника старшего научного сотрудника к.т.н. ОАО «Институт Цветметобработка» И.И. Курбаткина: «Исследование образцов, отобранных из различных мест литой оболочки скульптурной группы и барельефа памятника Минину и Пожарскому, проводили современными методами металлографии и рентгеноструктурного анализа. Изучение обнаруженных макро- и микродефектов показало, что их образование связано с двумя причинами. Первая – это дефекты, возникающие при литье. Как правило, это газовые поры, раковины, микротрещины, образующиеся в процессе кристаллизации и усадки отливки и располагающиеся по всему объему материала. Вторая связана с известным в настоящее время процессом «сезонное растрескивание», вследствие обесцинкования материала, которое проявляется по границам зерен и наблюдается ближе к поверхности... На основании структурных исследований установлен тот факт, что в отливке существуют значительные напряжения 1 рода, вызванные объемной усадкой при кристаллизации сплава. Эти напряжения могут вызывать дополнительное коррозионное растрескивание материала. Металлографический анализ показал, что структурное разрушение метал-

ла начинается по границам дендритных ячеек и приводит к необратимому разрушению по границам зерен. В результате снижаются прочностные характеристики металла. Наиболее интенсивному воздействию окружающей среды подвергается поверхность материала памятника, где процессы коррозионного разрушения выражены в большей степени....».

7. Изготовление копии бронзовых и гранитных элементов памятника с максимальным приближением по качеству изготовления к подлиннику.

8. Установка копии на первоначальном историческом месте на Красной площади.

9. Создание оптимального температурно-влажностного режима для экспонирования и хранения памятника после реставрации,

Замечание: «...Надпись Гражданину Минину, конечно, не удовлетворительна: он для нас или мещанин Косма Минин по прозвищу Сухорукой, или думный дворянин Косма Минич Сухорукой, или, наконец, Кузьма Минин, выборный человек от всего Московского государства, как назван он в грамоте о избрании Михаила Федоровича Романова. Все это не худо было бы знать, также как имя и отчество князя Пожарского».

А. С. Пушкин

11.3. Бронзы

Бронзовый век. Важнейшими из производственных достижений во II тысячелетии до н.э. были широкое введение в употребление бронзы (сплава меди и олова) и применение лошади в качестве средства транспорта.

Оба нововведения быстро распространились среди различных народов и племен, и, как это часто бывает с нововведениями подобного рода, трудно установить, где они возникли впервые.

В Двуречье начали сплавлять медь с иранским оловом, во всяком случае, к концу III тысячелетия до н.э., но бронзовые изделия начинают появляться около этого же времени и в других местах.

Бронза куется значительно хуже, чем медь, и изделия из бронзы более хрупки. Но эти недостатки бронзы с избытком покрываются ее важными преимуществами, обеспечившими

относительно быстрое ее распространение: бронза тверже меди и в меньшей мере подвержена коррозии. Температура плавления бронзы значительно ниже, чем меди, а литейные качества несравненно выше; эти обстоятельства, учитывая уровень технических знаний древнего человека, должны были сыграть огромную роль.

Если медные руды встречаются редко, то залежи оловянных руд встречаются еще реже; сочетание же тех и других в одном районе является исключением. Вследствие этого бронза долго была сравнительно редким и дорогим металлом.

Но в течение II тысячелетия возникают многочисленные центры производства бронзы во многих областях Европы и Азии, а также в Египте. Уже в первой половине II тысячелетия до н.э. в большинстве стран, население которых знало использование металлов, бронза решительно преобладала перед медью.

Мышьяковистая бронза. Наиболее древняя выплавка мышьяковистой меди относится к середине V тысячелетия до н.э. в местечке Тепе-Яхья, на юго-востоке Ирана, в Закавказье с IV тыс. до н.э., в Германии, Испании, Португалии с III тысячелетия до н.э.

Мышьяк в медных сплавах улучшал их физико-механические свойства. Уже 0,5% As улучшает ковкость в холодном состоянии, дает возможность получать более плотные отливки, увеличивает жидкотекучесть, что облегчает получение плотных отливок в рельефных формах. С увеличением содержания As до 8% пластичность не ухудшается, а выше этого предела пластичность падает, и сплав становится хрупким. На рис.18 показана диаграмма состояния Cu – As.

Твердость мышьяковистых бронз находится на уровне оловянных. Цвет мышьяковистой меди (бронзы) различен – от белого до красноватых и золотистых оттенков.

Мышьяковистые минералы обычно распространены в верхних частях месторождений первичных мышьяковисто-колчеданных руд, и в древности человеку не представляло трудности их обнаружить в местах залегания.

Первоначально мышьяковистые минералы: золотистый аурипигмент As_2S_3 и ярко-красный реальгар As_4S_4 – могли привлечь внимание человека как магические средства, в частности и потому, что красные минералы с древнейших времен наделялись волшебными свойствами.

Предположение о применении в древности плавильщиками реальгара и аурипигмента было подтверждено многочис-

ленными опытными лабораторными плавками.

Плавильщик не мог не заметить, что присадка этих минералов дает сплав лучшего качества. Меняя доли добавляемых минералов, он получал сплавы различных цветов и с хорошими механическими свойствами. Такое резкое изменение окраски и свойств металла при введении малых добавок было, несомненно, одним из источников, питавших позже алхимиков в их представлении о трансмутации металлов и о «философском камне», малое количество которого «совершенствует» большое количество металла.

При использовании мышьяковистых минералов было замечено, что выделяющиеся при плавке соединения мышьяка отрицательно сказываются на здоровье плавильщиков, так как соли мышьяка ядовиты.

Оловянная бронза. Переход от медно-мышьяковых сплавов к медно-оловянным был постепенным, и первоначально олово присаживали к меди совместно с мышьяком. Этим, видимо, объясняется, что в странах на Ближнем Востоке и в некоторых других регионах в начальном периоде «бронзового века» оловянная бронза содержит небольшое количество олова и притом совместно с мышьяком. Исключением являются древние бронзы Таиланда и Пакистана, не содержащие мышьяка, табл. 55.

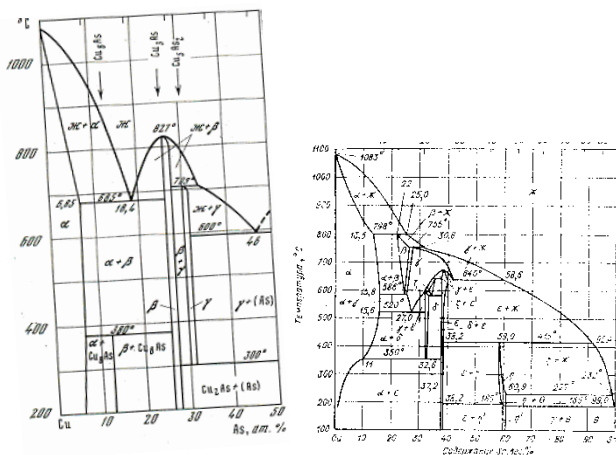


Рисунок 142. Диаграмма состояния Cu – As (слева) и Cu – Sn (справа)

Таблица 55

Сведения о древнейших медно-оловянных предметах

Страна	Памятник	Предметы	Датировка (гг. до н.э.)	Sn, %	As, %
Таиланд	Бан Чианг	Кинжал	3600	2,5	-
Иран	Тепе-Яхья	Кинжал	3000	3,0	1,1
Азербайджан	Бабадервиш	Крючок	3000-2500	0,97	1,3
Иран	Ур	Лезвие	2800-2500	2,40	-
Турция	Троя II	Лезвие	2500-2000	2,18	0,97
Пакистан	Мохенджо Дар	Лезвие	2100-1700	1,2	-
Египет	Гробница Тутанхамона	Лезвие	2000-1800	1,8	Следы
Англия	Игминтон	Кинжал	1700	1,54	2,9

Выплавка олова из его природной окиси-касситерита SnO_2 с древесным углем довольно проста, и выплавленное олово может быть добавлено к выплавленной меди для получения бронзы.

Другой вариант возможного получения бронзы – совместная плавка медных руд, предварительно смешанных с касситеритом. Таким путем можно получать сплавы с различным содержанием олова (так как чистый касситерит содержит почти 80% олова).

Древние металлурги при примитивной технологии установили, что содержание олова в сплаве делает металл более твердым и хрупким, а уменьшение – мягким и пластичным. Поэтому для ударных орудий в медную основу обычно добавляли 4% Sn, для рубящих и режущих – от 5 до 9% Sn, для колющих и некоторых типов строительных орудий – от 9 до 12% Sn и выше. Украшения также содержали высокий процент олова. Серпы же имеют малый процент олова, так как при большом содержании олова тонкое лезвие быстро выходило из строя, становилось ломким и выкрашивалось.

Инженерное художественное материаловедение

Многовековой опыт изготовления изделий из бронзы, задолго до установления диаграммы состояния Cu-Sn (рис.19), достаточно точно установил для определенных изделий конкретное содержание Sn, что находится в полном соответствии с диаграммой состояния Cu-Sn, табл.56.

Таблица 56

Состав специальных (функциональных) оловянистых бронз

Назначение бронзы	Cu, %	Sn, %	Zn, %	Pb, %	Прочие, %
Оружейная	89-91	9-11	2	1,5	
Колокольная	77-80	20-23	1-25	1-4	0,6-2,0Ni; 0,1-1,5Ag
Китайские гонги и тамтамы	80	20			
Японский колокольный металл	62,5	25	9,38		3,12Fe
Колокольчики с серебряным звоном	40	60			
Зеркальная	66,67	33,33			
Старые китайские зеркала	80,88			9,7	8,4Sb
Японские и китайские бронзы с черным цветом	82-90			10-18	
Монетная: - оловянная - алюминиевая	95 91,5	4	1		8,5Al

Новейшие художественные бронзы имеют следующий состав, %:

Cu	Sn	Zn	Pb	Ni	Fe
80-90	3-8	1-10	1-3	-	-

Например, «Медный всадник» имеет следующий состав, %:

1-я заливка	89,90	7,53	2,45	0,11	0,125	0,09
2-я заливка	91,10	7,46	1,92	0,08	0,13	0,08

Химический состав и назначение художественных бронз показано в табл. 57.

Таблица 57

Химический состав, %, и назначение художественных бронз

Марка	Sn	Zn	Pb	Cu	Примеси (Sb, Fe, Al)	Назначение
-------	----	----	----	----	----------------------	------------

БХ1	4-7	5-8	1-4	Ост.	3,0	Отливки бюстов, статуй
БХ2	1-5	8-13	1-6	Ост.	3,0	Крупное декоративное литье
БХ3	0,5-3,0	25-35	1-3	Ост.	3.0	Мелкое декоративное литье

Диаграмма состояния Cu–Sn изображена на рис. 142. В этой системе в твёрдом состоянии образуются следующие фазы:

α -твёрдый раствор Sn в Cu (содержание Sn 13,5%; растворимость Cu в Sn менее 0,01%);

β -твёрдый раствор на основе β -электронного соединения Cu₅Sn;

δ -электронное соединение Cu₃₁Sn₈;

γ -твёрдый раствор на основе химического соединения Cu и Sn (кристаллическая структура, стехиометрия которого пока не установлена);

ϵ -электронное соединение Cu₃Sn;

η -химическое соединение.

Структура у сплавов Cu–Sn существенно отличается от состояния равновесия. Так, при содержании 5% и более Sn в литой структуре возникает δ -фаза (в равновесном состоянии эвтектид δ оформляется при содержании 26,8% Sn и температуре 520 °C). Хрупкая δ -фаза не позволяет обрабатывать бронзу методами пластической деформации, поэтому сплавы с 5-6% Sn применяют для литья. В отожжённом состоянии бронза с содержанием до 14% Sn имеет однородную структуру α -твёрдого раствора.

Как литейный материал бронза обладает высокой жидкотекучестью, она хорошо заполняет самые сложные формы, имеет небольшую усадку, выдерживает различные виды обработки (ковку, чеканку, резание, гравировку), имеет красивый цвет и высокую коррозионную стойкость.

Со времен древних римлян мы находим бронзы, содержащие кроме меди и олова некоторое количество цинка. Присадку цинка к художественной бронзе следует признать весьма желательной, так как он понижает температуру плавления, делает бронзу более жидкоплавкой и лучше заполняющей литейную форму. При этом следует учитывать, что излишнее количество

цинка (более 8-10%) удешевляя бронзу, значительно понижает ее положительные качества: бронза теряет свой красивый красноватый или золотистый цвет, становится желтоватой и покрывается на открытом воздухе темным налетом.

Кроме цинка в художественных бронзах постоянным вспомогательным легирующим компонентом является свинец. Главным назначением свинца в указанных сплавах является улучшение их механической обрабатываемости; стружка становится ломкой, бронзовые изделия хорошо поддаются чеканке.

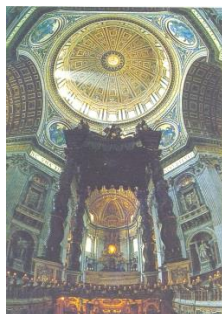
Бронзы, содержащие олово, являются широко интервальными сплавами, дают незначительную усадку (в пределах 1%), хорошо заполняют литейную форму и дают отчетливый отпечаток, обладают высокой коррозионной устойчивостью и замечательными эстетическими качествами. Слишком большое содержание цинка в бронзе способствует его испарению и получению пористой отливки. Бронзы рационального состава должны под воздействием атмосферных условий покрываться красивым налетом углекислых солей, называемых патиной. Первоначально образуется сульфат меди $\text{CuSO}_4 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, который с течением времени превращается в $\text{CuSO}_4 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$. В некоторых случаях присутствует небольшое количество карбоната $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$. Вблизи от морского побережья возникает основной хлорид $\text{CuCl}_2 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$. Присадка к бронзе от 1 до 3 % свинца, не влияя заметно на цвет изделия, несколько повышает жидкотекучесть и облегчает обработку пуансоном и грабштихелем.

В XII-XVII вв. в Древней Руси отливки производились из сплава «спруда», состоящего из меди, олова, цинка и, возможно, свинца.

В XV-XVII вв. отливки производили из красной меди с оловом, с XVIII в. – из желтой меди (бронзы с добавлением цинка). С середины XIX в. для отливок памятников применялась «сукрасная бронза», в состав которой входила цинковая лигатура (до 5%). В конце XIX в. широкое применение для художественного литья нашла бронза, состоящая из 82% Cu, 13,5% Zn, 3% Sn и 1,5% Pb, [51].

В Западной Европе для художественного литья применялись бронзы, по составу аналогичные бронзам, имевшим место на Руси.

На рис. 143 показан балдахин собора Святого Петра в Ватикане; колонны, носящие название «Соломоновых столбов», имеют высоту 26 м.



а

б

Рисунок 143. Витые «Соломоновы колонны» (темного цвета) 26-метрового балдахина, выполненные из бронзы (а) и их расположение в соборе Святого Петра (б) [19]

Сплавы на основе Cu и (Al, Pb, Si, Be и др.) называют специальными бронзами.

Для улучшения механических и технологических свойств в состав бронз вводят дополнительные элементы (Zn, Ni, Mn, P) и другие компоненты [42]. Так, в оловянных бронзах цинк повышает механические свойства и жидкотекучесть, свинец улучшает антифрикционные свойства и обрабатываемость резанием, фосфор повышает антифрикционные свойства и жидкотекучесть.

В алюминиевых бронзах железо и марганец улучшают механические свойства, повышают антикоррозионную стойкость; никель улучшает механические свойства, сообщает жаропрочность и антикоррозионность.

В оловянных бронзах содержится обычно до 10% Sn, а также для улучшения механических и литейных свойств, облегчения механической обработки и удешевления дополнительно вводят Zn, Pb, P, Ni.

Обработке давлением поддаются лишь некоторые бронзы, содержащие не более 8% Sn (табл. 58).

Таблица 58

Бронзы оловянные, обрабатываемые давлением (ГОСТ 5017-74)

Марка	Химический состав (основа Cu), %		
	Sn	P	Прочие
БрОФ8-0,3	7,5-8,5	0,26-0,35	0,10-0,20 Ni
БрОФ7-0,2	7,0-8,0	0,10-0,25	—
БрОФ6,5-0,4	6,0-7,0	0,26-0,40	0,10-0,20 Ni
БрОФ6,5-0,15	6,0-7,0	0,10-0,25	—
БрОФ4-2,5	3,5-4,0	0,20-0,30	—
БрОФ2-0,25	1,0-2,5	0,02-0,3	—
БрОЦ4-3	3,5-4,0	—	2,7-3,3 Zn
БрОЦС4-4-2,5	3,0-5,0	—	3,0-5,0 Zn; 1,5-3,5 Pb
БрОЦС4-4-4	3,0-5,0	—	3,0-5,0 Zn; 3,5-4,5 Pb

Литейные оловянные бронзы базируются на системах Cu–Sn и Cu–Sn–Zn–(Pb). Они характеризуются широким температурным интервалом кристаллизации ($\Delta t_{кр}=180^{\circ}\text{C}$) и значительной растворимостью олова в твёрдом состоянии. Это создаёт большую склонность к дендритной ликвации; в обычных условиях литья неравновесная β -фаза (твёрдый раствор на основе интерметаллида Cu_5Sn) появляется в структуре при концентрации более 7–8% Sn. При охлаждении β -фаза претерпевает эвтектоидное превращение $\beta \rightarrow \alpha + \gamma$ при 586°C , затем $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$ при 520°C и $\delta \rightarrow \alpha + \epsilon$ при 350°C . Таким образом, структура бронз, содержащих менее 8% Sn, представляет собой α -твёрдый раствор дендритного строения с неравновесным распределением компонентов вследствие дендритной ликвации.

Структура сплавов с концентрацией более 8% Sn состоит из α -фазы и эвтектоида $\alpha + \delta$. Появление эвтектоида δ ($\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$) вызывает возрастание твёрдости и прочности сплавов; максимум этих значений достигается при 20–25% Sn.

Пластичность сплавов с увеличением содержания олова сначала возрастает и достигает максимума при 5–7% Sn, а затем быстро снижается до малых значений при 12–15% Sn. Это предопределяет величину содержания олова в бронзах: в сплавах общего назначения верхний предел равен 6–10% Sn, а в высокопрочных бронзах – до 16–19% Sn. В действующий ГОСТ включены бронзы с содержанием олова не свыше 10%, что связано с необходимостью экономного легирования). Нижний предел легирования (2–3% Sn) определяется необходимостью получения мини-

мального растворного упрочнения. Свойства некоторых литейных оловянных бронз показаны в табл. 59.

Таблица 59

Бронзы оловянные литейные (ГОСТ 613-79)

Группа	Марка	Механические свойства			Литейные свойства	
		σ_B , МПа (кгс/мм ²)	δ , %	HB, МПа (кгс/мм ²)	Жидкотекучесть $I_{ж}$, см	Линейная усадка ϵ , %
Cu–Sn	БрО10Ф1	215(22)	3	637(65)	45	1,3
Cu–Sn–Zn	БрО8Ц4	196(20)	10	735(75)	54	1,5
	БрО10Ц2	215(22)	10	637(65)	40	1,5
Cu–Sn–Zn–Pb	БрО4Ц4С17	147(15)	5	588(60)	25	—
	БрО5Ц5С5	147(15)	6	588(60)	40	1,6
	БрО3Ц12С5	176,2(18)	8	588(60)	55	1,6
Cu–Sn–Pb	БрО5С25	147(15)	5	588(60)	20	1,5
	БрО10С10	176,2(18)	7	637(65)	26	1,5
Cu–Sn–Zn–Ni	БрО3Ц7С5Н1	176,2(18)	8	588(60)	21	5

Примечание: литейные свойства приведены при литье в кокиль, а механические – при литье в песчаные формы.

Из-за большого температурного интервала кристаллизации оловянные бронзы обладают умеренной жидкотекучестью, значительной усадочной пористостью и очень небольшой усадочной раковинкой. По этой причине литье бронзы в песчаные формы даёт малую линейную усадку ($\sim 0,8\%$), что позволяет получать чёткое воспроизведение рельефа формы в сложных фасонных отливках с резкими переходами от толстых сечений к тонким. Отливки в кокиль получаются более плотными, и линейная усадка возрастает до 1,4-1,6%.

В большинстве случаев горячеломкость отливок из оловянных бронз невелика и вызывается главным образом наружной коркой.

Чисто оловянные бронзы в настоящее время не применяются, в них вводят различные добавки, улучшающие механические, технологические и служебные характеристики.

Фосфор вводят в количестве 0,10–0,40%. Он является интенсивным раскислителем медных сплавов и сильным упрочнителем как по растворному типу, так и вследствие образования интерметаллидных соединений (Cu_3P , Ni_3P).

Цинк является одной из основных добавок в оловянных бронзах; он вводится в количестве 2–12% и благотворно влияет на комплекс свойств. Кроме того, цинк позволяет экономить более дефицитное и дорогое олово и частично заменяет медь. Цинк входит в твёрдый раствор и при постоянном содержании олова несколько улучшает прочность и пластичность сплавов; в оловянно-свинцовых бронзах он также улучшает равномерность распределения свинца. При введении цинка возрастает коррозионная стойкость бронзы в морской воде. Частичная замена олова цинком заметно уменьшает $\Delta t_{\text{кр}}$. Это приводит к улучшению литейных свойств: повышается жидкотекучесть, возрастает плотность отливок, уменьшается склонность к обратной ликвации. Наиболее удачное сочетание содержания олова и цинка: 5-6% Sn и 5-6% Zn (например, бронза БрО5Ц5С5).

Свинец может быть основным компонентом в свинцовых бронзах (БрС30) или вспомогательным в оловянных бронзах (БрО10С10). Главное назначение свинца – улучшение антифрикционных свойств сплава. Свинец образует в структуре медных сплавов самостоятельные выделения мягкой металлической фазы, поэтому с увеличением содержания свинца прочность и твёрдость снижаются, улучшается обрабатываемость резанием. При оптимальных концентрациях свинец повышает жидкотекучесть сплавов, плотность и герметичность отливок. Оловянно-свинцовые бронзы являются одними из лучших антифрикционных материалов, так как олово обеспечивает достаточную прочность и износостойкость сплава, а свинец – прирабатываемость.

Никель измельчает зерно, способствует выравниванию свойств литого металла, повышает его пластичность и прочность, а также уменьшает ликвацию в Cu–Sn–Pb бронзах.

Основные виды термической обработки бронз – гомогенизация и промежуточный отжиг. Основная цель этих операций – облегчение обработки давлением. Гомогенизацию проводят при 700–750 °С с последующим быстрым охлаждением. Для снятия остаточных напряжений в отливках достаточно 1 ч отжига

при 550 оС.

Промежуточный отжиг при холодной обработке давлением проводят при температуре 550–700 оС.

Специальные бронзы. По главному легирующему элементу различают бронзы алюминиевые, бериллиевые, кремнистые, марганцевые, свинцовые и др.

Алюминиевые бронзы. В меди растворяется следующее количество алюминия (рис. 144): 7,5 % при 1035 °С, 9,4 % при 565 оС и около 9 % при комнатной температуре.

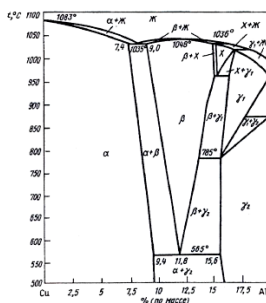


Рисунок 144. Диаграмма состояния Cu–Al

Медь образует с алюминием широкую область α -твёрдых растворов замещения с кристаллической решёткой КГЦ K12, а также β -фазу на базе электронного соединения Cu_3Al . β -фаза претерпевает эвтектоидное превращение при 565 °С по реакции $\beta \rightarrow \alpha + \gamma_2$, где γ_2 -фаза на основе электронного соединения Cu_9Al_4 .

С увеличением содержания алюминия прочностные свойства сплавов повышаются. Сплавы с α -структурой характеризуются высокой пластичностью, хорошо обрабатываются давлением, их используют для глубокой штамповки. Оптимальными механическими свойствами обладают сплавы, содержащие 5-10% Al, табл. 60.

Таблица 60

Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением
(ГОСТ 18175–78)

Марка	Химический состав (основа Cu), %	
	Al	Прочие
БрА5	4,0-6,0	
БрА7	6,0-8,0	

БрАМц9-2	8,0-10,0	1,5-2,5 Mn
БрАМц10-2	9,0-11,0	1,5-2,5 Mn
БрАЖц9-4	8,0-10,0	2,0-4,0 Fe
БрАЖМц10-3-1,5	9,0-10,0	2,0-4,0 Fe; 1,0-2,0 Mn
БрАЖН10-4-4	9,5-11,0	3,5-5,5 Mn; 3,5-5,5 Ni
БрБ2	—	1,8-2,1 Be; 0,2-0,9 Ni
БрБНТ1,9	—	1,85-2,10 Be; 0,2-0,4 Ni; 0,10-0,25 Ti
БрБНТ1,9Mг	—	1,85-2,10 Be; 0,2-0,4 Ni; 0,10-0,25 Ti; 0,07-0,13 Mg
БрКМц3-1	—	1,0-1,5 Mn; 2,7-3,5 Si
БрАЖНМц9-4-4-1	8,8-10,0	4,0-5,0 Fe; 0,5-1,2 Mn; 4,0-5,0 Ni
БрMгO3	—	0,2-0,5 Mg
БрMц5	—	4,5-5,5 Mn

В отличие от оловянных бронз сплавы Cu–Al являются узкоинтервальными ($\Delta t_{кр}=46^{\circ}\text{C}$). Вследствие этого алюминиевые бронзы имеют меньшую склонность к дендритной ликвации, большую плотность отливок, лучшую жидкотекучесть, более высокую прочность, жаропрочность, коррозионную стойкость и меньшую склонность к хладноломкости. Вместе с этим алюминиевые бронзы имеют значительную ($\sim 2\%$) усадку, склонность к столбчатой структуре, трудность пайки твёрдыми и мягкими электродами.

Для устранения этих недостатков алюминиевые бронзы дополнительно легируют Mn, Fe, Ni и др.

Железо (1-4%) измельчает зерно и упрочняет твёрдый раствор, замедляет эвтектоидный распад β -фазы с образованием γ_2 .

Марганец повышает прочность, пластичность и коррозионную стойкость.

Никель в сплавах Cu – Al даёт интерметаллиды Ni_3Al и NiAl , которые упрочняют сплав по дисперсному механизму.

Литейные алюминиевые бронзы приведены в табл. 61.

Таблица 61

Бронзы безоловянные литейные (ГОСТ 493–79)

Марка сплава	Химический состав (основа Cu), %			Механические свойства		
	Al	Fe	Прочие	σ_B , МПа (кгс/мм ²)	δ , %	HB, МПа (кгс/мм ²)
БрА9Мц2Л	8,0-9,5	—	1,5-2,5 Mn	392(40)	20	784(80)
БрАЮМц2Л	9,6-11,0	—	1,5-2,5 Mn	490(50)	12	1078(110)
БрА9ЖЗЛ	8,0-10,5	2,0-4,0	—	392(40)	10	980(100)
БрА10ЖЗМц2	9,0-11,0	2,0-4,0	1,5-2,5 Mn	392(40)	10	980(100)
БрА10Ж4Н4Л	9,5-11,0	3,5-5,5	3,5-5,5 Ni	587(60)	5	1568(160)
БрА11Ж6Н6	10,5-11,5	5,0-6,5	5,0-6,5 Ni	587(60)	12	1568(160)
БрЛ9Ж4Н4Мц1	8,8-10,0	4,0-5,0	0,5-1,2 Mn; 4,0-5,0 Ni	—	—	—
БрС30	—	—	27,0-31,0 Pb	58,7(6)к	4	245(25)
БрС60Н2,5	—	—	59,5-60,5 Pb; 2,3-2,7 Ni	—	—	—
БрА7Мц15ЖЗН2Ц2	6,6-7,5	2,5-3,5	14,5-15,5 Mn; 1,5-2,5 Ni; 1,5-2,5 Zn	157(16)к	2	637(65)
БрCuНЗЦЗС20Ф	—	—	3,0-4,0 Ni; 18,0-22,0 Pb; 0,15-0,30 P; 3,0-4,0 Zn; 3,0-4,0 Sb	607(62)	18	—

Для повышения пластичности алюминиевые бронзы подвергают нормализации при 600-700 оС или закалке от 950 оС. Упрочняющая термическая обработка состоит в закалке с 850-900 оС в воде и последующем отпуске при 400-600 оС в течение 1,5 ч.

Бериллиевые бронзы. Сплавы меди с бериллием отличаются уникальным благоприятным сочетанием в них высоких прочностных и упругих свойств, высокой электро- и теплопроводности, высокого сопротивления разрушению и коррозионной стойкости. Бериллий обладает в меди уменьшающейся с понижением температуры растворимостью (рис. 145), поэтому бериллиевые бронзы термически упрочняются.

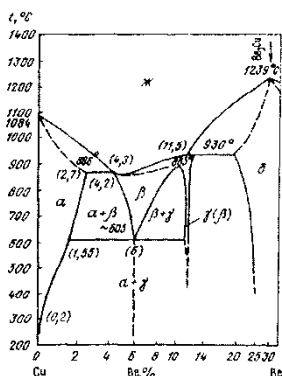


Рисунок 145. Диаграмма состояния Cu-Be

После закалки с температур, соответствующих α -области (~ 780 оС), структура бериллиевых бронз представлена пересыщенным α -твёрдым раствором. В закаленном состоянии бериллиевые бронзы отличаются высокой пластичностью и технологичностью, достаточной для холодной обработки давлением.

Бериллиевые бронзы дополнительно легируют Ni и Ti. После старения при температуре 320-340 оС выделяются дисперсные частицы CuBe, TiBe₂, Cu₃Ti, упрочняют сплав по дисперсному механизму и значительно повышают прочностные свойства, табл. 62.

Таблица 62

Механические свойства бериллиевых бронз

Марка бронзы	Закалка		Закалка и старение		
	σ_B , МПа	δ , %	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
БрБНТ1,9	400-500	38-45	1150-1250	700	4-6
БрБ2	400-500	38-40	1150-1250	600	4-6
БрБ2,5	4	—	—	50	
	00-500				
БрБНТ1,7	300-400	45-50	1000-1100	400	5-7

Кремнистые бронзы. Кремнистые бронзы являются сплавами меди с 0,6-3,5% Si и небольшим количеством Ni и Mn. Диаграмма состояния системы Cu-Si показана на рис. 146.

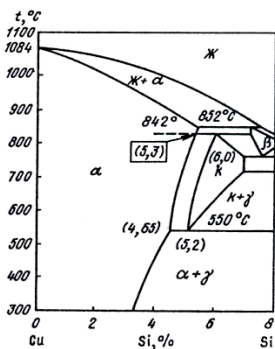


Рисунок 146. Диаграмма состояния Cu–Si

Кремнистые бронзы успешно подвергаются обработке давлением и литьём (см.табл. 60).

Марганцевые бронзы. Система Cu–Mn принадлежит к растворам с неограниченной растворимостью, рис. 147.

Марганец раскисляет сплавы во время плавки, снижает температуры ликвидуса и солидуса, улучшает литейные характеристики, обеспечивает улучшение свариваемости. Марганцевые бронзы хорошо обрабатываются давлением как в горячем, так и в холодном состоянии. Наибольшее распространение получила бронза БрМц5 (см.табл. 60), которая отличается повышенной коррозионной стойкостью и жаропрочностью. Марганцевые бронзы обладают большой способностью гасить колебания, возникающие в деталях машин и конструкций при их эксплуатации. Применение этих сплавов приводит к снижению вибраций деталей, уменьшению шума, снижает опасность разрушения изделий из-за резонансных явлений.

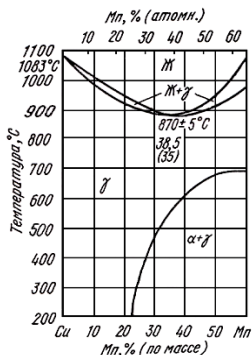


Рисунок 147. Диаграмма состояния Cu–Mn

Свинцовые бронзы. Эти бронзы обладают наилучшими антифрикционными свойствами. Свинец практически нерастворим в меди. После затвердевания структура состоит из кристаллов меди с включениями свинца. Благодаря такой структуре бронза БрС30 (см. табл. 61) имеет высокие антифрикционные свойства, хорошую прирабатываемость, высокую теплопроводность. Прочность и твёрдость свинцовых бронз невысока, поэтому их наплавляют на стальные трубы или ленты.

11.4. Иллюстрации бронзовых художественных изделий

Бронза в искусстве, с глубокой древности материал для декоративно-прикладных изделий и скульптуры, в которую при литье колоколов, а в средневековом Китае и при литье сосудов добавляли серебро. Отличные литейные свойства бронзы позволяют воспроизводить мельчайшие детали скульптурной модели; упругость, вязкость, пластичность дают возможность, не прибегая к дополнительным опорам, создавать объёмные композиции с резким выносом и сильным расчленением частей, получать полые, относительно лёгкие отливки. Бронза, окисляясь, приобретает стойкую окраску (естественную патину) — от зелёной до густо-коричневой и чёрной, а кроме того, хорошо поддаётся химической тонировке (патинированию), золочению, полировке, ковке, чеканке, гравировке, что помогает разнообразить цвет и фактуру изделий. Оружие из бронзы показано на рис. 148.



Рисунок 148. Оружие бронзового века

С середины III тысячелетия до н.э. в Месопотамии, а со II тысячелетия в Египте вслед за применением примитивной техники литья в открытые формы (из камня, песка, дерева и проч.) появилось литье в створчатые формы из глины, снятые с лепной или резной модели.

Отлитые в них части круглой скульптуры и сосудов скрепляли оловом. Места соединения сглаживали чеканкой, которой также прорабатывали рельефные детали, что усиливало их контраст с обобщенно-монументальными поверхностями, часто полированными. Иногда чеканка дополнялась гравировкой. Так, **медная голова Саргона Древнего из Ниневии**, XXIII в. до н.э., рис.149,а, настолько четко была подвергнута гравировке, что дала повод высказать некоторым исследователям предположение об изготовлении ее методом чеканки и отождествить ее с золотым чеканным **шлемом Мескаламдуга** (правитель Ура) из гробницы Месилима, рис.149,б [48, 50].

САРГОН Древний (аккадск. — Шаррум-кен, Шаррукин), основатель царства Аккад, правил 55 лет (2316-2261 до н. э.). Родом из г. Азупирану («городок крокусов»), выходец из низов. Настоящее имя Саргона неизвестно, имя, принятое им по восшествии на престол, означает «царь истинен». До этого жил в Кише и был приближенным или слугой-чашеносцем царя Ур-Забабы; после разрушения Киша царем Шумера Лугальзаггиси (Лугальзаггеси) провозгласил себя царем, избрав столицей государства почти безвестный город Аккад. Киш, однако, сохранил некоторую автономию, и по-прежнему имел собственных царей.

Мескаламдуг ([шумер.](#) «Герой доброй страны») — один из первых царей ([лугалей](#)) [шумерского](#) города [Ура](#), правил в [XXVI веке до н. э.](#) В «[Шумерском царском списке](#)» не упоминается, поскольку, очевидно, владел лишь Уром, а не всем Шумером. Найдены золотой [шлем](#) и золотая [цилиндрическая печать](#) Мескаламдуга, на которой написано «*Мескаламду[г] — лугаль*». Другие источники, в которых упоминалось бы его имя, неизвестны. [Лео-нард Вулли](#), руководивший раскопками, полагал, что имеются в виду два разных правителя с одним именем. Позже в Мари было найдено упоминание Мескаламдуга в качестве отца Месанепады. Шлем был похищен во время погрома Багдадского музея в апреле 2003 года. В Британском музее хранится его гальванопластическая копия.



Рисунок 149. Медная голова Саргона Древнего (1); золотой шлем Мескаламдуга из гробницы Месилима (2)

Обратившись к **фантастической Химере**, мастер соединил в ее теле льва, змею, в которую превращен хвост, и козла, неожиданно вырастающего из спины льва. Напряжение и ярость чудовища трактованы с большой экспрессией: оно рычит, припав на передние лапы, оскалена пасть, шерсть на спине и гриве поднялась дыбом. Скульптор не скрывает здесь эмоции, как в статуе волчицы, но высвобождает их от пластической скованности, присущей памятникам архаического искусства.



Рисунок 150. Статуя Химеры. Бронза. Конец V в. до н. э. Высота 80 см. Флоренция, Национальный археологический музей.

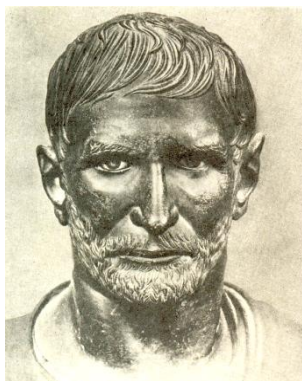
Королевство Бенин стало одним из могущественных государств Западной Африки около 1400 г. В 1485 г., примерно столетие после того, как в стране были отлиты первые бронзовые из-

делия, через торговать с Бенином начали португальцы. В обмен на перец, слоновую кость и рабов португальцы поставляли бронзу в виде наручников. После того как ввоз сырья в страну был обеспечен, в XVI и XVII вв. в Бенине наступила эпоха расцвета бронзового литья. Бенинцы отливали прямоугольные массивные бронзовые рельефные пластины, на которых были запечатлены многочисленные обитатели дворца – правители Бенина, а также большие бронзовые змеи, отлитые по частям и прикрепленные к крышам дворца. Головы усопших правителей, как отлитые из бронзы, так и вырезанные из слоновой кости, использовались при ритуальных обрядах.

В 1898 году британцы совершили карательную операцию в Бенин, разграбили дворец, вывезли в Англию или уничтожили многие произведения самобытного искусства бенинцев. В Англии скульптуры бенинцев произвели подлинную сенсацию. В 1919 г. директор Этнографического музея в Берлине так оценил изделия бенинских мастеров: «Ни Бенвенуто Челлини, ни кто бы то ни было другой не смог бы отлить эти скульптуры лучше», рис. 151 (1), [48].



1



2

Рисунок 151.. Бронзовая голова королевы Бенин. 1500 г. Лондон (1). Портрет римлянина (так называемый первый консул Брут). Бронза. Вторая половина IV в. до н.э.

В **Римской республике** (III-I вв. до н.э.) ведущую роль занимали те виды искусства, которые имели практическое значе-

ние; отсюда доминирующую роль в развитии скульптуры занимал портрет. В портрете римлян, в отличие от греков, у которых портрет отражал типические черты, присущие представителю греческого общества, художник ставил задачу увековечить черты данного конкретного лица. Римские мастера умели создавать яркие типические образы, исходя из конкретной индивидуальности. В республиканскую эпоху были созданы портреты большой художественной силы. Так, например, бронзовый бюст римлянина – так называемый «Брут» из Палаццо Консерватории в Риме, рис.151 (2), дает пример портрета, в котором раскрыт человеческий характер. В этом произведении нашел яркое воплощение образ сурового, непреклонного римлянина эпохи республики.

Резные массивные **ритуальные сосуды** из бронзы, изготовленные ремесленниками, принадлежавшими к различным тайным обществам, служили древним китайским императорам для процедур жертвоприношений. В них наливали вино или другую забродившую жидкость, например от зерна ил и кумыса. Во время жертвоприношений часть жидкости выливали на жертвенник и отдавали, таким образом, дань богам и усопшим предкам, а оставшуюся часть выпивали. Каждый из таких сосудов, в зависимости от своей формы, имел собственное название и использовался в строго определенных целях; например, котел для приготовления пищи душам предков, стоящий на трех или четырех ножках, назывался «тинь». Наиболее распространенными мотивами декоративных украшений таких сосудов были дикие, домашние или мифологические животные – лошади, буйволы, бараны, тигры, драконы, слоны и другие. А некоторые из сосудов и сами были сделаны в форме животного, рис. 152 (1).

Открытие в начале нашего века знаменитого ныне **искусства Ифе** породило множество разнообразных гипотез. Не сопоставимый ни с чем известным в то время натуралистический стиль и совершенство бронзового литья, казалось, свидетельствовали о какой-то обособленной и чужеродной культуре. Вместе с тем ярко выраженный местный этнический тип, запечатленный в бронзовых и терракотовых портретах, указывал на то, что речь может идти только о местной культуре, испытывавшей в той или иной мере какие-то внешние влияния. В качестве возможных агентов этих влияний называли португальцев, карфагенян, нубийцев и т. д. Фробениус считал Ифе центром древней могучей империи – легендарной Атлантиды, воспомина

лись в виде преданий, после того как связи ее с внешним миром были полностью прерваны. Во времена Фробениуса было известно сравнительно небольшое число памятников искусства Ифе. С тех пор благодаря серии находок, значительно расширивших представления о древней истории народа йоруба, стало очевидно, что речь идет о действительно мощном очаге культуры, оказавшем заметное влияние на обширные территории к северу и востоку от дельты Нигера. У народов, населяющих сопредельные территории, можно и теперь обнаружить элементы религиозных верований йоруба, их художественных традиций, социальной организации. Среди других бронзовых изделий здесь была найдена отлично сохранившаяся фигура они Ифе в полный рост, в парадной одежде, рис. 152 (2).

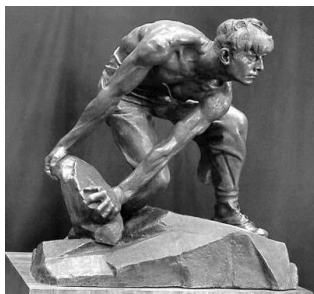


Рисунок 152. Китайский сосуд «ху» для жертвенного вина. 16—11 вв. до н. э. Галерея Фрир. Вашингтон, (1). Полуфигура царя они Ифе. Бронза. Ифе, Нигерия. Нигерийский музей, Лагос. 12—14 вв. (?), 2)

«**Булыжник — оружие пролетариата**» — знаменитая скульптура, выполненная советским скульптором И. Д. Шадром в 1927 году из гипса и в 1947 году отлитой в бронзе. Гипсовая версия хранится в Третьяковской галерее. Копия из бронзы в 1967 году установлена в Пресненском районе Москвы, в парке Декабрьского восстания. Герой скульптуры представляет собой обобщённый образ пролетария начала XX века, борца за революционные идеалы и свободу. Скульптура приобрела популярность в СССР и дала начало шутливо-ироничному крылатому выражению «Булыжник — оружие пролетариата», рис. 153 .

«Булыжник — оружие пролетариата» является одним из самых ярких явлений реалистического искусства XX века. В основе композиции лежит виток раскручивающейся спирали. Рельефная пластика тела пролетария передана скульптором очень выразительно и точно показывает состояние душевного подъёма, создавая героический образ, символизирующий эпоху Октябрьской революции и начала Советской власти. Напряжённость борца-пролетария роднит его с «Дискоболом» Мирона, а волевая устремлённость, читающаяся в чертах лица, — с «Давидом» Микеланджело.

(**Rodin**) (1840-1917), французский скульптор. С 1880 и до конца жизни Роден работал над символически воплощавшей мир человеческих страстей горельефной композицией "Врата ада", навеянной "Божественной комедией" Данте, мотивами античной мифологии, библейских легенд, поэзии Ф. Вийона и современной Родену поэзии. Отдельные темы этой композиции Роден разрабатывал в виде самостоятельных произведений (многочисленные варианты, бронза и мрамор - в Музее Родена, Париж, в Лувре, ГЭ, ГМИИ и других собраниях). Таковы острогротескная фигура "Та, которая была прекрасной Ольмьер" (1885), пронизанная ярким эмоциональным порывом группа "Поцелуй" (1886), исполненная пластической мощи, драматизма и духовного величия статуя "**Мыслитель**" (1888), рис. 153 (2). С середины 80-х гг. в творчестве Родена всё более нарастает тяготение к усложнённым символическим образам, к выявлению человеческих эмоций - от ясной гармонии и мягкого лиризма до отчаяния и мрачной сосредоточенности. Произведения Родена приобретают эскизный, как бы незаконченный характер, контрастнее становится игра света и тени, а моделировка форм, иногда текучих, - подчёркнуто живописной.



1



2

Рисунок 153. Д. Шадр. «Бульжник — оружие пролетариата». 1927 (бронзовый отлив — 1947) (1). "Мыслитель". Бронза. 1888. Музей Родена. Париж. (2)

Уникальная находка и продукт изысканной торевтики IV в. до н. э., — этот сосуд использовался в качестве урны для хранения пепла покойного в Дервенийской гробнице № 2, рис. 154. Первоначально сосуд предназначался для смешивания вина и воды. Его тщательно продуманное художественное исполнение представляет собой гимн богу Дионису, его всемогуществу в природе и власти над жизнью и смертью.



Рисунок 154. Дервенийский кратер. Бронза. 330—320 гг. до н. э. Салоники, Археологический музей.

На лицевой стороне вазы (главная сторона) изображена священная свадьба бога и Ариадны. Пара изображена на скале, и обнаженный Дионис интимно положил свою ногу на бедро своей жены. Ариадна, приподнимающая свое покрывало, пристально смотрит на своего мужа с характерным свадебным жестом. Позади Диониса стоит пантера — животное, посвященное богу. Пару окружает свита бога, менады; некоторые из них уносятся в оргиастическом танце, тогда как другие сидят на плечах кратера. По-

верхность всего кратера украшают мифические фигуры, ручные и дикие животные, виноградные и плющевые ветви. Своим золотым цветом ваза обязана особому составу из бронзы и большого количества олова, при этом без следа золота. Она скована из двух больших листов, соединенных в тех местах на шейке, где размещены украшающие ее животные. Статуэтки на плечах кратера, ножка и волюты на ручках были отлиты. На губах вазы надпись серебряными буквами сообщает имя ее владельца: Астион, сын Анаксагора, из Лариссы. Неизвестно, был ли покойный непосредственно владельцем вазы. Это единственный неповрежденный бронзовый сосуд с рельефным украшением, сохранившийся с этого периода. Возможно, его создатель был скульптором и торевтом из какого-то ионийского города Халкидики, который обучался в Афинах. 330—320 гг. до н. э.

В 1479—1488 гг. Верроккьо работал над конным памятником венецианскому **кондотьеру Бартоломео Коллеони**, отлитым в бронзе уже после смерти скульптора. Этот памятник стал, подобно донателловскому «Гаттамелате», классическим примером конного монумента эпохи Возрождения. В отличие от Гаттамелаты с его спокойствием и уверенностью фигура Коллеони полна огромного внутреннего напряжения. Он как бы стоит в седле, всей тяжестью тела опираясь на стремяна, и властной рукой ведет своего коня, слившись с ним в одно целое. Лицо кондотьера в обрамлении бронзового шлема дышит неукротимой волей и воинственностью. Круглые сверлящие глаза и опущенные углы сжатых губ придают ему выражение жестокости и неистовства. Гордое движение коня передано с большой выразительностью. Голова коня, его мощная шея в складках, вздувшиеся вены исполнены не только с великолепным знанием анатомии, но и с большой художественной экспрессией. Скульптура установлена на высоком постаменте на площади у церкви Сан Джованни э Паоло и, в отличие от «Гаттамелаты», в непосредственной близости от храма, как бы сливаясь с его внушительным массивом. Из-за небольших размеров площади памятник воспринимается преимущественно с близких расстояний, обрисовываясь в сильном ракурсе, который повышает свойственное ему выражение гордой мощи, рис. 155.



Рисунок 155. Вероккьо. Конная статуя Коллеони. 1480 г.

Будда Весеннего Храма ([кит. упр.](#) 鲁山大佛, [пиньинь](#): *Lǔshān Dàfó*) — одна из самых больших статуй в мире, изображает Будду [Вайрочана](#), рис. 156. Находится в поселке Чжаоцунь в провинции Хэнань, недалеко от национального шоссе №.311. Статуя была завершена в 2002 году. Высота статуи 128 метров, которые включает в себя 20 метров пьедестала в виде лотоса. Пьедестал хотят увеличить на 25 метров, таким образом общая высота памятника будет 153 метра. По состоянию на октябрь 2008 года, холм, на котором стоит памятник переформируют в ещё два пьедестала, верхний из которых 15 метров, увеличив высоту памятника до 208 метров. Первоначально предполагалось, что статую сделают из 1100 частей литой меди, с общим весом 1000 тонн. Планы строительства Будды Весеннего Храма были объявлены вскоре после взрыва талибами бамианской статуи Будды в Афганистане. Китай осудил систематическое разрушение буддийского наследия Афганистана.



Рисунок 156. Статуя Будда. Весенний храм, Лушан, Китай. Высота 128 м, стоит на здании буддийского монастыря. (Zgpdszz). 2002 г.

Котоку-ин (яп. 高德院) — буддийский храм секты дзёдо в городе Камакура в префектуре Канагава, Япония. Храм известен своим **«Большой Буддой»** (大仏, Daibutsu), монументальной открытой бронзовой статуей амитабхи Будды, которая является одним из самых известных символов Японии, рис. 157. Бронзовая статуя, вероятно, датируется 1252 годом, то есть периодом Камакура, в соответствии с храмовыми записями. Этому предшествовала гигантская деревянная статуя Будды, которая была завершена в 1243 году после десяти лет непрерывного труда, средства поступали от Инанадо-Цубони и буддийского священника Джоко из Тотоми. Эта деревянная статуя была разрушена бурей в 1248 году, и зал, в котором она находилась, был также разрушен, так что Джоко предложил сделать другую статую из бронзы; также огромное количество денег, необходимых для этого и для нового зала, было вложено в проект. Бронзовая статуя, вероятно, была сделана Оно Горёмоном или Танси Хисатомо, ведущими японскими скульпторами из бронзы того времени. В определённый период времени статуя была позолоченной. До сих пор ещё имеются следы позолоты возле ушей статуи. Неясно, однако, является ли статуя, созданная в 1252 году, той же статуей, что доступна сейчас. Зал был разрушен бурей в 1334 году, был восстановлен, после чего был повреждён ещё одной бурей в 1369 году и был восстановлен ещё раз. Последнее здание, вмещавшее статую, было смыто цунами 20 сентября 1498 года во время периода Муромати. С тех пор Большой Будда стоит на открытом воздухе.

Статуя примерно 13,35 метра высотой, включая основание, и весит около 93 тонн. Статуя является полой, и посетители могут осмотреть её внутреннее пространство. Многие посетители на протяжении многих лет оставляли надписи на внутренней стороне статуи. В свое время было тридцать два бронзовые лепестки лотоса у подножья статуи, но только четыре осталось к сегодняшнему дню, и все они уже не на первоначальном месте. Великое землетрясение Канто 1923 года уничтожило основание, на котором сидит статуя, но оно было отреставрировано в 1925 году. Ремонт памятника был проведён в 1960-1961 годах, когда шея была укреплена и были приняты меры, чтобы защитить его от землетрясений.



Рисунок 157. Бронзовая статуя Будды находится в храме Котоку-ин в Камакуре, Япония. XIII в. Масса 93 т, внутри – полая
Медный всадник — памятник Петру I на Сенатской площади в Санкт-Петербурге, 158.

Открытие памятника состоялось 7 августа (18 августа) 1782 г. Позднее памятник получил своё название благодаря знаменитой одноимённой поэме А.С. Пушкина, хотя на самом деле изготовлен из бронзы. Модель конной статуи Петра выполнена скульптором Этьеном Фальконе в 1768—1770. Голову Петра лепила его ученица, Мари-Анна Колло. Змею по замыслу Фальконе вылепил Фёдор Гордеев. Отливка статуи осуществлялась под руководством мастера Емельяна Хайлова и была закончена в 1778 году. Архитектурно-планировочные решения и общее руководство осуществлял Ю.М. Фельтен.

В августе 1766 года русский посланник в Париже Д.А. Голицын заключил контракт с французским скульптором Фальконе, рекомендованном Екатерине II её корреспондентом философом-просветителем Д. Дидро. Вскоре по прибытии Фальконе в Петербург, 15 октября 1766 года, работы по созданию монумента двинулись полным ходом. Мастерскую устроили в бывшем Тронном зале деревянного Зимнего дворца Елизаветы Петровны. Каменное здание бывшей конюшни при дворце приспособили для жилья Фальконе. В начале 1773 года в помощь к Фальконе был назначен Фельтен: он должен был заменить уволенного от работ капитана де Ласкари, и, кроме того, к этому времени понадобился надзор профессионала-архитектора за установкой памятника.



Рисунок 158. «Медный всадник», Э. Фальконе. Бронза, 1782 г., Сенатская площадь, Санкт-Петербург

«Гром-камень». Найти подходящие камни для монумента сразу не удалось, и тогда в газете «Санкт-Петербургские ведомости» было опубликовано обращение к частным лицам, которые пожелали бы «для постановления... монумента в гору выломать и привезти сюда, в Санкт-Петербург». Подходящий камень был указан казённым крестьянином Семёном Григорьевичем Вишняковым, поставщиком строительного камня в Санкт-Петербург, давно знавшем об этой глыбе и имевшем намерение найти ей применение для собственных нужд, расколов на куски, но не нашедшем для этого нужного инструмента. Об этом он сообщил капитану Ласкари, руководителю поисковых работ в этом проекте. Место, где найден был Гром-камень, до сих пор точно не установлено. Известно лишь, что это было лесистое и весьма сырое место в районе деревни Лахта, и что путь камня до места погрузки был равен приблизительно 8 верстам, то есть примерно 8,5 километрам. Учитывая, что путь камня неоднократно менялся, и перемещали его не по прямой, следует ожидать, что камень был найден в следующих современных границах: на западе — посёлок Лисий Нос, прямо на север — до нынешней Кольцевой автодороги, по дороге и южнее её на восток до речки Чёрной и затем на юг через Юнтоловской лесной дачи, включая его весь, до северного берега Лахтинского разлива.



Рисунок 159. Транспортировка «Гром-камня».

Началу перевозки камня соответствовала серьёзная подготовка. Были приняты во внимание рекомендации, которые разработал И. И. Бецкой, проведено исследование модели «машины», предлагаемой для перевозки камня. При этом было найдено, что наиболее соответствующей задаче является установка камня на деревянной платформе, перекатываемой по двум параллельным желобам, в которые были уложены 30 пятидюймовых шаров. Посредством эксперимента был выбран достаточно прочный материал для этих шаров, состоящий из сплава на основе меди, и отработана технология его изготовления. Разработан технологический процесс подъёма камня с помощью рычагов и домкратов для подведения под него платформы. При этом специально были приняты меры по страховке камня от его падения при аварии. Для его извлечения потребовалась работа тысяч людей, для проживания которых была построена деревня. Камень весил 1600 тонн. Его транспортировка до берега Финского залива осуществлялась несколькими воротами. Для перевозки камня были выбраны зимние месяцы, когда почва подмёрзла и смогла выдерживать тяжесть. По приказу Екатерины камень должен был быть доставлен на место целым. Работавшие на камне постоянно во всё время движения каменотёсы в количестве 46 человек лишь придавали ему надлежащую форму, рис. 159. Эта уникальная операция продолжалась с 15 ноября 1769 года по 27 марта 1770 года. Камень был доставлен на берег Финского залива, где для его погрузки соорудили специальную пристань. При малой воде остатки этой пристани можно видеть у берега невядалеке от расколотоу валуна, лежащего у самого уреза воды. Транспортировка камня по воде осуществлялась на специально построенном для этого судне по чертежу известного корабельного мастера Григория Корчебникова и началась только осенью. Гигантский «Гром-камень» при огромном стечении народа прибыл в Петербург на Сенатскую площадь 26 сентября 1770 года. Для выгрузки камня у берега Невы был использован приём, уже применённый при погрузке: судно было притоплено и село на предусмотрительно вбитые в дно реки сваи, что дало возможность сдвинуть камень на берег. Несмотря на все принятые меры за всё время пути неоднократно создавались аварийные ситуации, грозившие крахом всему предприятию, за которым следила с интересом общественность всей Европы. Тем не менее руководители работ всегда находили выход из положения. В честь перевозки камня была выбита па-

матная медаль с надписью «Дерзновению подобно».



Рисунок 160. Гранитный постамент «Медного всадника»

Постамент в виде громадной скалы — символ преодоленных Петром I трудностей, а введенная в композицию змея представляет собой остроумную находку в решении задачи по обеспечению статической устойчивости монумента, рис. 160.

11.5. Медно-никелевые сплавы

Медь с никелем образуют непрерывные твердые растворы, рис. 161. Никель существенно упрочняет медь.

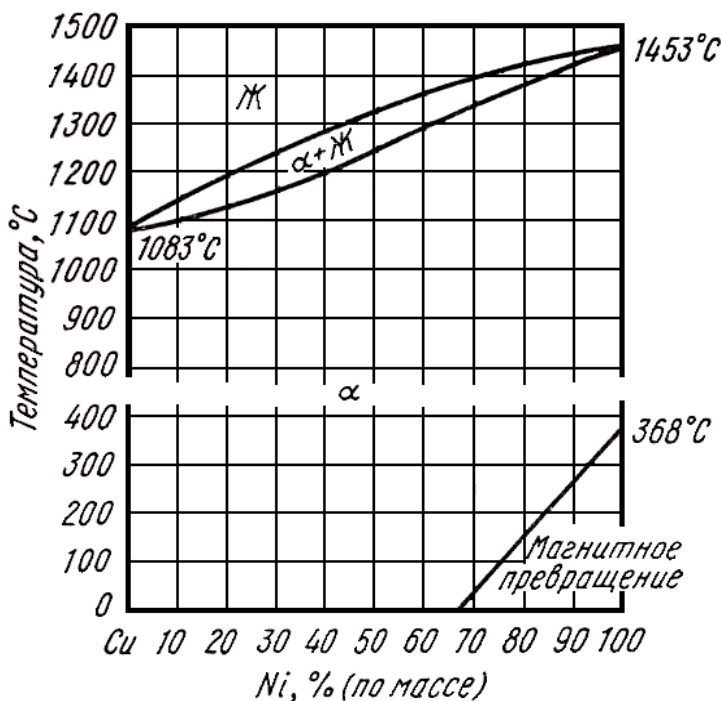


Рисунок 161. Диаграмма состояния Cu-Ni

Медно-никелевые сплавы разделяют на две группы: коррозионно-стойкие и электротехнические. Типичные механические свойства медно-никелевых сплавов, обрабатываемых давлением, приведены в табл. 63.

Таблица 63

Механические свойства некоторых коррозионно-стойких медно-никелевых сплавов в отожжённом состоянии (ГОСТ 492-73)

Название сплава	Марка	Механические свойства		
		σ _в , МПа	δ, %	KCU, МДж/м ²
Никель полуфабрикатный	НП1(99,9Ni)			
	НП2(99,5Ni)			
	НП3(99,3Ni)			
	НП4(99,0Ni)			

Мельхиор	МЖНМц30-1-1	400	25	—
Мельхиор	МН19	400	35	—
Нейзильбер	МНЦ15-2	415	40	—
Нейзильбер	МНЦ16-29-1,8	400	40	—
Куниаль А	МНА13-3	380	13	0,5
Куниаль Б	МНА6-1,5	360	28	1,2
Манганин	МНМц3-12	—	—	—

К коррозионно-стойким сплавам относятся мельхиор, нейзильбер, куниали.

Мельхиорами называют двойные и более сложные сплавы на основе меди, основным легирующим элементом которых является никель. Мельхиоры имеют однофазную структуру и хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии. Дополнительное легирование Fe и Mn сплавов меди с никелем обеспечивает высокую коррозионную стойкость в пресной и морской воде и паре. Изделия из мельхиора приведены на рис 162 и 163.



1

2

Рисунок 162. Посуда из мельхиора.



Рисунок 163. Поднос с
рюмками. Мельхиор.

[javascript::javascript::](#)

Нейзильберы представляют сплавы системы Cu–Ni–Zn и содержат 5-3 5% Ni и 13-45 % Zn. Сплавы указанных составов (кроме высокоцинковых) лежат в области α -твёрдого раствора и имеют однофазную структуру. Нейзильберы по сравнению с мельхиорами характеризуются более высокой прочностью из-за дополнительного легирования цинком. Они легко поддаются горячей и холодной обработке давлением. Нейзильберы отличаются красивым серебристым цветом, не окисляются на воздухе и устойчивы в растворах солей и органических кислот, рис. 164 и 165.



Рисунок 164. Кольцо с малахитом. (1) и аквама-
рином (2).
Нейзильбер.



Рисунок 165. Белый дракон. Нейзильбер (белый металл).

Куниалями называют сплавы системы Cu–Ni–Al. Никель и алюминий при высоких температурах растворяются в меди в больших количествах, но с понижением температуры растворимость резко уменьшается. По этой причине кунiali упрочняются закалкой (900-1000 оС) и старением при 500-600 °С до $\sigma_B \sim 640 \text{ МПа}$, $\delta = 50\%$. Дисперсионное твердение происходит за счёт выделения фаз Ni_3Al и NiAl . Кунiali отличаются высокими механическими и упругими свойствами, коррозионной стойкостью,

удовлетворительно обрабатываются давлением в горячем состоянии. Купериты не склонны к хладноломкости.

Медно-никелевые сплавы также используются для производства отливок. Химический состав литейных и деформируемых сплавов отличается незначительно – в основном содержанием примесей.

К электротехническим сплавам относятся термоэлектродные: сплав МНО6(ТП); сплав МН16(ТБ); копель МНМц43-0,5; хромель Т(ХХ9,5) и К(ХХ9); алюмель ММцАК2-2-1 и др.

Применение меди и её сплавов. Чистая медь и малолегированные сплавы с высокой электропроводностью широко используются в электротехнике: провода различного назначения, коллекторные и токоподводящие шины и другие изделия высокой электропроводности. Из меди изготавливаются изделия с высокой теплопроводностью: теплообменники, печи для плавки активных металлов (Ti, Zr, тугоплавкие), водоохлаждаемые изложницы, кристаллизаторы.

Из высокотехнологичных латуней (Л68, Л63) изготавливаются изделия методом глубокой вытяжки: радиаторные и конденсаторные трубки, сильфоны, гибкие шланги, трубы, ленты.

Специальные латуни, обладающие высокой прочностью и коррозионной стойкостью, применяются в судостроении, электромашиностроении, теплотехнике и др.

Из латуней, легированных свинцом, изготавливают детали, работающие в условиях трения.

Оловянные бронзы используются в машиностроении: прокладки подшипников и втулок, червячных колёс и других деталей, работающих на трение.

Алюминиевые бронзы используются для изготовления ответственных деталей: шестерни, втулки, седла клапанов, подшипники, пружины и пружинящие детали и др.

Бериллиевую бронзу используют для наиболее ответственных назначений: плоские пружины, мембраны, детали точного машиностроения и др.

Свинцовые бронзы являются лучшими подшипниковыми материалами.

Коррозионно-стойкие медно-никелевые сплавы применяют в установках для опреснения морской воды, в морском судостроении, для изготовления медицинского инструмента и деталей точных приборов, табл. 64.

Мельхиоры и нейзильберы широко используются в де-

Инженерное художественное материаловедение

коративно-прикладном искусстве, в посудном производстве и др.

Таблица 64

Применение медно-никелевых сплавов

Материал	Применение, другое обозначение (если есть)
МН0.6	для производства проволоки, предназначенной для изготовления компенсационных проводов. СплавТП
МН10	конденсаторные трубы, сварные конструкции в судостроении МН-10
МН16	для производства проволоки, предназначенной для изготовления компенсационных проводов. Тип сплава - мельхиор СплавТБ
МН19	плакировочный материал для медицинских инструментов, точная механика; сплав плохо деформируется в холодном состоянии, хорошо сваривается, коррозионно-стойкий. Тип сплава - мельхиор
МН25	монеты, декоративные изделия; сплав плохо деформируется в холодном состоянии, хорошо сваривается, коррозионно-стойкий. Тип сплава - мельхиор
МН95-5	в машиностроении
МНА13-3	прутки для изготовления изделий повышенной прочности в машиностроении КуниальА
МНА6-1.5	полосы для изготовления пружин и других изделий в электротехнической промышленности КуниальБ

МНЖ5-1	Трубопроводы, детали для электротехники и приборостроения; электроды для сварки медно-никелевого сплава между собой и латунью и алюминиево-марганцевой бронзой. Сплав хорошо деформируется в холодном состоянии, коррозионно-стойкий
МНЖКТ5-1-0.2-0.2	Проволока для ручной, полуавтоматической сварки в защитных газах медно-никелевых сплавов, медно-никелевых сплавов и меди с бронзой, латунью и сталью (углеродистой, легированной и коррозионно-стойкой), а также наплавки на сталь
МНЖМц10-1-1	конденсаторные трубы, трубные доски кондиционеров в приборостроении; сплав деформируется в холодном состоянии, хорошо сваривается, коррозионно-стойкий. Тип сплава - мельхиор
МНЖМц30-1-1	конденсаторные трубы маслоохладителя, трубные доски кондиционеров, в приборостроении; сплав хорошо сваривается, коррозионно-стойкий, эрозивно-стойкий. Тип сплава - мельхиор
МНМц3-12	для электротехнических целей, измерительных приборов
МНМц40-1.5	для изготовления полуфабрикатов (проволока, ленты и полосы), применяемых для электротехнических целей и компенсационных проводов Константан
МНМц43-0.5	проволока для термопар и компенсационных проводов Копель
МНМцАЖ3-12-0.3-0.3	проволока для компенсационных проводов

Инженерное художественное материаловедение

МНЦ12-24	горячепресованные детали; сплав хорошо деформируется в холодном состоянии, хорошие пружинные свойства. Тип сплава - нейзильбер
МНЦ15-20	пружины реле, детали для электротехники, детали, получаемые глубокой вытяжкой, столовые приборы; сплав хорошо деформируется в холодном состоянии, коррозионно-стойкий, хорошие пружинные свойства. Тип сплава - нейзильбер
МНЦ18-20	пружины реле, детали, получаемые глубокой вытяжкой, столовые приборы, художественные изделия; сплав хорошо деформируется в холодном состоянии, коррозионно-стойкий, хорошие пружинные свойства. Тип сплава - нейзильбер
МНЦ18-27	горячепрессованные детали; сплав хорошо деформируется в холодном состоянии, хорошие пружинные свойства. Тип сплава - нейзильбер
МНЦС16-29-1.8	в часовой промышленности. Тип сплава - свинцовистый нейзильбер
НМЖМц28-2.5-1.5	для полуфабрикатов (проволока, ленты, листы и полосы), применяемых при изготовлении антикоррозионных деталей Монель