

Е. Т. КОНДРАТЬЕВ

**ТЕХНОЛОГИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ
И МАТЕРИАЛО-
ВЕДЕНИЕ**

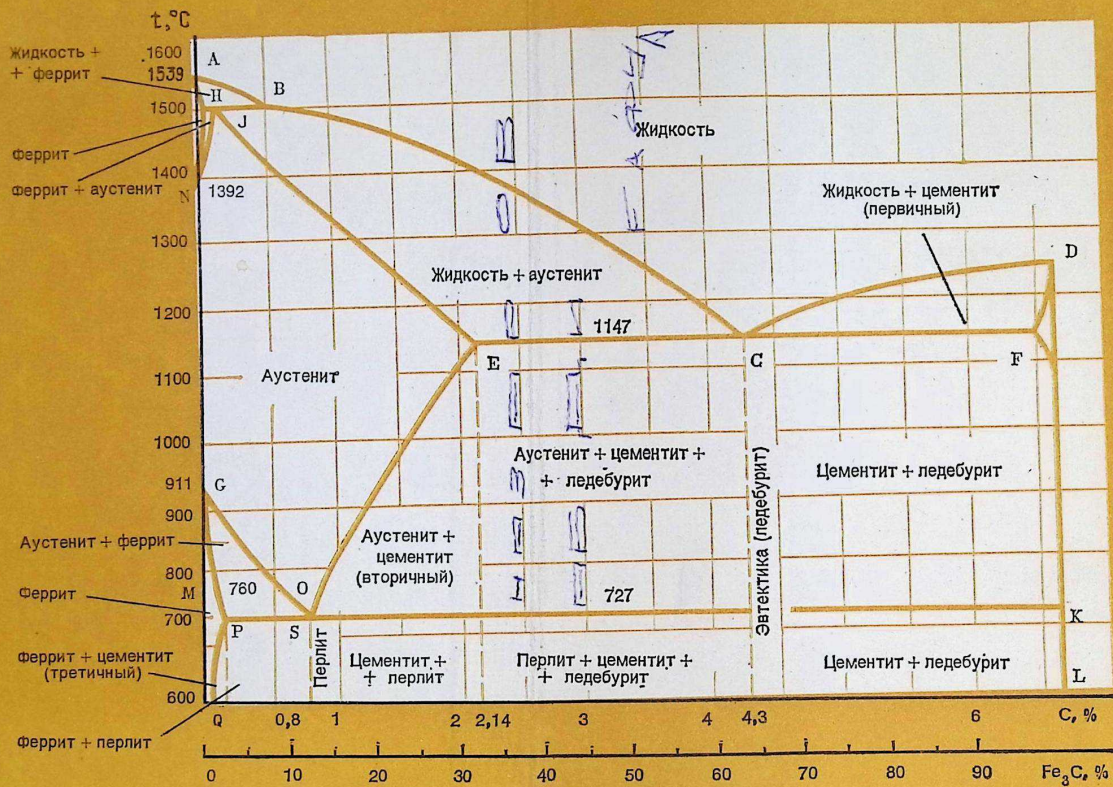


Рис. 5.11. Диаграмма состояния Fe-C

164-б.ст.



УЧЕБНИКИ
И УЧЕБНЫЕ
ПОСОБИЯ
ДЛЯ ВЫСШИХ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

669
К-642
Е. Т. КОНДРАТЬЕВ

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Допущено Главным управлением высшего и среднего сельскохозяйственного образования Министерства сельского хозяйства ~~СССР~~ в качестве учебного пособия для студентов высших сельскохозяйственных учебных заведений по специальностям 1509 — «Механизация сельского хозяйства», 1510 — «Электрификация сельского хозяйства» и 1515 — «Автоматизация сельскохозяйственного производства».

Библиотека
Сам СХИ
ИНВ.



МОСКВА «КОЛОС» 1983

ББК 30.3

К64

УДК 669.018.2 : 621.7(075.8)

Рецензенты: кандидаты технических наук, доценты *Г. К. Потапов, А. М. Пономаренко* (МИИСП), *Ю. Н. Баранов* (ЛСХИ).

Кондратьев Е. Т.

К 64 Технология конструкционных материалов и материаловедение. — М.: Колос, 1983. — 272 с., ил., 4 л. ил. (Учебники и учеб. пособия для высш. с.-х. учеб. заведений).

Содержит материалы по основам производства черных и цветных металлов, литейному производству, обработке давлением, сварочному производству. Приведены сведения по теории сплавов, различным видам термической и химико-термической обработки. Дана классификация, основные области применения сплавов на основе железа и цветных металлов.

Предназначена для студентов инженерных факультетов сельскохозяйственных вузов.

К $\frac{3802040400-061}{035(01)-83}$ 249-83

ББК 30.3

606

© Издательство «Колос», 1983

ВВЕДЕНИЕ

Предмет «Технология конструкционных материалов и материаловедение» предусматривает изучение основ производства чугуна, стали, цветных металлов и сплавов, широко применяемых в сельскохозяйственной технике, основных способов горячей обработки, ознакомление со свойствами материалов и применением их в автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении.

~~Успехи~~ наметил грандиозные задачи по развитию отраслей народного хозяйства, которые тесно связаны с предметом, изложенным в данном учебном пособии. В черной металлургии главным направлением прогресса должно стать коренное улучшение качества и увеличение выпуска эффективных видов металлопродукции. Для получения изделий с повышенной износостойкостью, долговечностью, коррозионной стойкостью, а также для снижения трудоемкости и металлоемкости машин и механизмов намечено увеличить производство металлического порошка в 3 раза, развивать промышленное производство прецизионных сплавов и проката. Дальнейшее наращивание производства стали будет осуществляться путем развития кислородно-конвекторного и электроплавильного методов. Выпуск электростали увеличится в 1,6 раза.

В цветной металлургии намечено укрепление сырьевой базы действующих предприятий, а также ее дальнейшее опережающее развитие. Производство алюминия должно возрасти на 15...20%, меди — на 20...25%, никеля и кобальта не менее чем в 1,3 раза.

Развитие отечественной металлургии неразрывно связано с именем инженера П. П. Аносова (1797...1851 гг.), который разработал технологию выплавки высококачественной стали, установил зависимость свойств металлов от их кристаллического строения, впервые применил микроскоп для изучения строения стали. Ученый-металлург Д. К. Чернов (1839...1921 гг.) первым научно объяснил процессы нагрева и охлаждения металлов, указал способы управления этими процессами.

Советские академики А. А. Байков и Н. С. Курнаков разработали современную теорию образования спла-

вов и методы их физико-химических исследований. В разработку теории и технологии термической обработки весомый вклад внесли С. С. Штейнберг (1872...1940 гг.), Н. А. Минкевич (1883...1942 гг.) и др.

Развитием и совершенствованием сварочной техники и технологии занимались русские ученые Н. Н. Бенардос (1842...1905 гг.) и Н. Г. Славянов (1854...1897 гг.). Крупный вклад в теорию и практику электродуговой сварки внесли и вносят исследования Украинского института электросварки АН УССР.

На современном этапе научно-технический прогресс в области производства, обработки и применения конструкционных материалов предъявляет повышенные требования к подготовке специалистов сельскохозяйственного производства. Настоящее учебное пособие призвано способствовать приобретению знаний и их практическому использованию при изготовлении и восстановлении деталей сельскохозяйственной техники.

Раздел **ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ** первый

Глава I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТАЛЛАХ

§ 1. Классификация металлов

Металлы, из которых изготовляют детали машин, механизмов и приборов, называют *конструкционными* или *машиностроительными*. Все металлы и сплавы делят на *черные* и *цветные*. К первым относят железо и сплавы на его основе (чугуны и стали), ко вторым — остальные.

Все известные в природе элементы разделяют на два класса: металлы и неметаллы.

Металлы обладают характерными свойствами: блеском, хорошей электро- и теплопроводностью и т. д. Сюда прежде всего следует отнести железо, медь, алюминий и др.

Неметаллы, называемые иногда металлоидами, не обладают характерными металлическими свойствами. К ним принадлежат сера, фосфор и др.

Металлические элементы составляют почти $\frac{3}{4}$ всех существующих в природе элементов, но не все они находят широкое применение в технике. Некоторые из них встречаются очень редко, чрезвычайно дороги. Это драгоценные (золото, серебро, платина) и редкие металлы (бериллий, ванадий, уран).

Многие металлы малопригодны к применению, так как обладают большой хрупкостью и твердостью (хром, марганец, сурьма и др.), что затрудняет их механическую обработку и обработку давлением. Их используют лишь в качестве специальных добавок к другим металлам.

Основные конструкционные металлы должны обладать определенными свойствами, обуславливающими их широкое применение. Они должны легко обрабатываться как давлением, так и резанием. Следовательно, им должны быть присущи высокая пластичность, позволяющая получать из них изделия любой формы, и невысокая твердость, дающая возможность обрабатывать их различными режущими инструментами. Для широ-

кого применения этих металлов необходимо, чтобы они были относительно дешевые.

Подобными свойствами обладают немногие металлы. К ним можно отнести железо, медь, алюминий, магний, цинк, свинец; отчасти можно отнести олово и никель, однако они более дорогие, так как менее распространены в природе.

Почти все современные металлические материалы состоят из этих восьми металлов в чистом виде (простые металлы) или в сочетании с другими элементами (сложные металлы — сплавы). Перечисленные металлы преобладают количественно и обуславливают свойства сплавов. Все добавляемые к ним элементы — как металлы, так и металлоиды — оказывают влияние на основной металл и изменяют его свойства.

§ 2. Атомно-кристаллическое строение металлов

В твердом состоянии атомы всех металлов и металлических сплавов располагаются в строгом порядке, образуя в пространстве правильную кристаллическую решетку. Такое расположение атомов отличает кристаллические тела от аморфных, в которых атомы расположены хаотически, беспорядочно.

Пространственная кристаллическая решетка любого металла состоит из множества сопряженных элементарных ячеек, составленных из атомов, размещенных в определенном порядке. Существует несколько типов кристаллических решеток. Основные показаны на рисунке 1.1. *Элементарная кристаллическая ячейка* — наименьший объем кристалла, дающий представление об атомной структуре металла. Расстояние между центрами ближайших атомов в элементарной ячейке называют периодом (параметр) решетки и измеряют в ангстремах Å ($1\text{Å} = 10^{-8}$ см).

Ячейку характеризуют плотностью упаковки и координационным числом.

Под *плотностью упаковки* подразумевают число атомов, приходящихся на одну элементарную кристаллическую ячейку. При рассмотрении рисунка 1.2 кажется, что ячейке принадлежат восемь образующих куб атомов. Однако это представление ошибочно, так как изображенная ячейка находится в окружении других ей по-

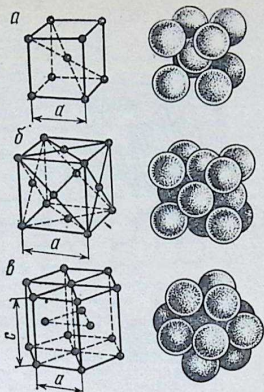


Рис. 1.1. Основные виды элементарных ячеек кристаллических решеток металлов:

a — объемноцентрированная кубическая; *b* — гранецентрированная кубическая; *в* — гексагональная.

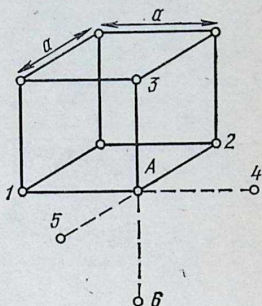


Рис. 1.2. Элементарная ячейка простой кубической решетки.

добных, поэтому каждый атом в вершине куба принадлежит восьми ячейкам. Следовательно, на долю данной ячейки приходится 1 атом.

Под *координационным числом* понимают число соседних атомов, находящихся на равном и наиболее близком расстоянии от данного атома. Оно характеризует взаимную связь атомов. Если избрать базовый атом *A* (рис. 1.2), то на равном и наиболее близком от него расстоянии в данной ячейке будут атомы 1, 2 и 3. В окружающих элементарных ячейках находятся еще три симметрично расположенных атома 4, 5 и 6. Следовательно, координационное число для простой кубической решетки будет равно 6. Однако этот простой тип решетки неприсущ металлам.

Для объемноцентрированного куба (ОЦК) координационное число равно 8, плотность упаковки равна 2. Для гранецентрированной кубической решетки (ГЦК) координационное число равно 12, плотность упаковки равна 4, для плотноупакованной гексагональной (ГСГ) — соответственно 12 и 6.

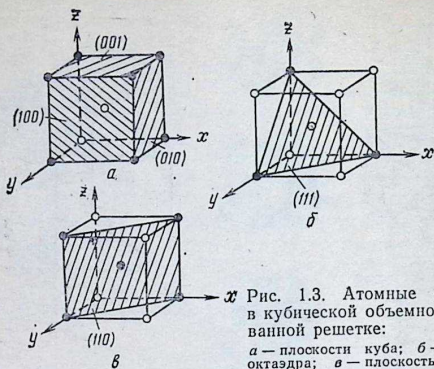


Рис. 1.3. Атомные плоскости в кубической объемноцентрированной решетке:

a — плоскости куба; *б* — плоскость октаэдра; *в* — плоскость ромбического додекаэдра.

Следует иметь в виду, что плотность расположения атомов для различных плоскостей неодинакова. В объемноцентрированной кубической решетке (рис. 1.3) плоскости (100) принадлежит лишь 1 атом, плоскости (110) — 2 атома (1 атом вносят атомы, находящиеся в вершинах, и 1 атом — в центре куба). Таким образом, в ОЦК плоскостью с наиболее плотным расположением атомов будет плоскость (110) .

Из-за разной плотности атомов многие свойства (химические, физические, механические) кристалла неодинаковы в различных плоскостях. Подобную неодинаковость свойств монокристалла в разных кристаллографических направлениях называют анизотропией.

§ 3. Строение реальных кристаллов

Исследования последних лет с применением электронного микроскопа и рентгеновского анализа показали, что кристаллическая структура реального кристалла не является правильной.

Характер и степень нарушения правильности строения кристаллического тела определяют в значительной мере его свойства, поэтому необходимо иметь представление о встречающихся несовершенствах кристаллического строения, о строении реальных кристаллов.

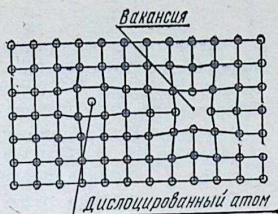


Рис. 1.4. Схема образования вакансии и дислоцированного атома.

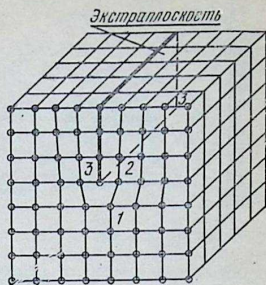


Рис. 1.5. Дислокация в кристаллической решетке.

Одним из видов несовершенства кристаллического строения является наличие незанятых мест (вакансии, или атомные «дырки») в узлах кристаллической решетки (рис. 1.4). Этот дефект решетки играет важную роль в протекании диффузионных процессов в металлах.

Другим важнейшим видом несовершенства кристаллического строения является *дислокация*, возникающая при появлении в кристаллической решетке по каким-либо причинам лишней полуплоскости атомов, называемой экстраплоскостью (рис. 1.5). Край 3—3 такой плоскости образует линейный дефект решетки, который называют линейной дислокацией.

Линейная дислокация может простираться в длину на сотни и тысячи параметров решетки, может быть прямой, может выгибаться в стороны. Вокруг дислокации возникает зона упругого искажения решетки. Из-за этого дислокации могут легко перемещаться вправо или влево от нейтрального положения и устанавливать связь своих краевых атомов 3 с атомами 1, а соседняя справа или слева полуплоскость будет при этом переходить в промежуточное положение, превращаясь в экстраплоскость и образуя дислокации вдоль краевых атомов 2. Таким образом дислокация может передаваться вдоль некоторой плоскости (плоскость скольжения), расположенной перпендикулярно к экстраплоскости.

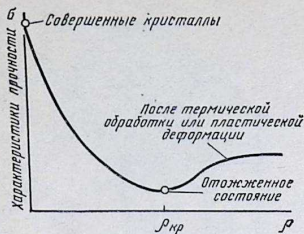


Рис. 1.6. Зависимость прочности от степени несовершенства кристаллического строения металлов и сплавов ρ .

В чистых металлах содержание дислокаций в 1 см^3 превышает 1 млн. Современные представления и опытные данные позволили И. А. Одингу установить схему зависи-

мости прочности металлов и сплавов от степени несовершенства кристаллического строения (рис. 1.6).

Многие вопросы материаловедения неразрывно связаны с теорией дислокаций, которая подсказывает пути реализации скрытых резервов прочности металлов, заключающиеся в более полном использовании сил межатомных связей в кристаллической решетке.

§ 4. Плавление и первичная кристаллизация

До определенной температуры все металлы находятся в твердом состоянии. Атомы, составляющие кристаллическую решетку, постоянно совершают колебательное движение с частотой порядка 10^{13} Гц. С повышением температуры амплитуда колебания растет, и при достижении строго определенной температуры (температура плавления) кристаллическая решетка разрушается. При этом атомы начинают хаотически перемещаться, и металл переходит из твердого состояния в жидкое. Аморфные (псевдотвердые) вещества не имеют строго определенной температуры перехода из твердого состояния в жидкое.

Все вещества могут находиться в четырех агрегатных состояниях: твердое, жидкое, газообразное и плазменное. Переходы из одного агрегатного состояния в другое называют *фазовыми превращениями*.

Кристаллизация — это образование кристаллов при переходе из жидкого или газообразного состояния в твердое. Форма, размеры и взаимное расположение кристаллов определяют все свойства металлов и сплавов.

При медленном охлаждении жидкого металла в точке t при температуре t в нем зарождаются первые центры кристаллизации (рис. 1.7). По мере отвода теп-

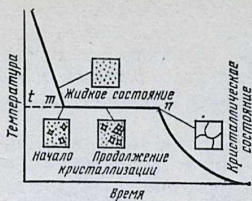


Рис. 1.7. Кривая охлаждения металла.

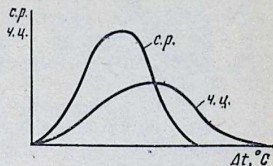


Рис. 1.8. Зависимость числа центров кристаллизации Ч. Ц. и скорости роста кристаллов С. Р. от степени переохлаждения Δt .

ла число центров увеличивается, ранее зародившиеся кристаллы растут. До тех пор пока весь жидкий металл не затвердеет (точка n), температура остается постоянной. Этот процесс сопровождается выделением скрытой теплоты кристаллизации, поэтому на кривой охлаждения образуется горизонтальный участок (площадка), который показывает, что затвердевание протекает при постоянной температуре. После завершения кристаллизации температура плавно понижается.

Температуру, при которой металл переходит из жидкого состояния в твердое, называют температурой первичной кристаллизации. Кроме первичной кристаллизации, возможна и вторичная — изменение кристаллического строения металлов в твердом состоянии.

При быстром отводе тепла некоторые металлы способны некоторое время находиться в жидком состоянии при температуре ниже границы первичной кристаллизации. Явление объясняют следующим образом. В результате быстрого отвода тепла образуется большое количество центров кристаллизации и происходит интенсивный их рост. Это приводит к выделению значительного количества тепла, способного некоторое время поддерживать металл в жидком состоянии и даже повысить его температуру.

Разность между теоретической t_T и фактической t_Φ температурами кристаллизации называют *степенью переохлаждения* $\Delta t = t_T - t_\Phi$.

Д. К. Чернов установил, что процесс кристаллизации можно определить количественно, если известны

скорость зарождения центров кристаллизации и скорость роста кристаллов. *Скорость зарождения* — число центров (*Ч. Ц.*) кристаллизации, возникающих в единице объема в единицу времени. *Скорость роста* (*С. Р.*) — увеличение линейных размеров грани кристалла в единицу времени.

Г. Тамман установил, что число центров кристаллизации и скорость роста кристаллов с повышением степени переохлаждения увеличиваются, достигают максимума, а затем уменьшаются до нуля (рис. 1.8).

§ 5. Строение металлического слитка

Кристаллы, образующиеся в процессе затверждения металла, могут иметь различные размеры и формы. Это зависит от скорости охлаждения, характера и количества примесей. Чаще всего образуются разветвленные древовидные кристаллы, получившие название дендритов (рис. 1.9). При затвердевании металла около одного из центров кристаллизации первоначально формируется главная (длинная) ветвь дендрита (ось первого порядка). Одновременно с удлинением оси первого порядка на ее ребре происходят зарождение и рост перпендикулярных к ней ветвей второго порядка, от последних растут оси третьего порядка и т. д.

На рисунке 1.9, б показан знаменитый дендрит Д. К. Чернова, обнаруженный им во внутренней полости (раковина) слитка стали. Масса кристалла 3,45 кг, высота 30 см.

Кристаллы дендритной формы иногда можно наблюдать в местах недостаточного подвода жидкого металла непосредственно на поверхности слитка в виде характерного рельефа или на поверхности усадочной раковины.

Кристаллическое строение стального слитка в связи с направленной кристаллизацией металла в изложницах от периферии к центру и снизу вверх, а также из-за изменяющихся условий затвердевания стали получается неоднородным (рис. 1.10). Слиток можно разделить на три структурные зоны. Снаружи на нем расположены мелкие равноосные кристаллы, получаемые в условиях наиболее быстрого охлаждения, далее — вытянутые столбчатые кристаллы и внутри — опять равноосные кристаллы. В верхней части слитка расположена

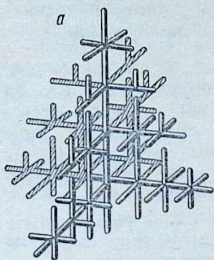


Рис. 1.9. Схема образования дендрита (а) и дендрит Д. К. Чернова (б).

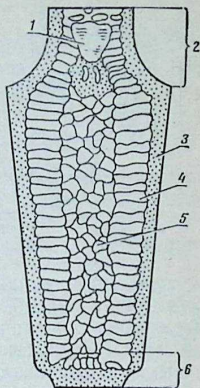


Рис. 1.10. Строение слитка спокойной стали:

1 — усадочная раковина; 2 — верхняя часть слитка (прибыль); 3 — зона мелких равноосных кристаллов; 4 — зона столбчатых кристаллов; 5 — зона более крупных равноосных кристаллов; 6 — донная часть слитка.

усадочная раковина. Верхняя (20...25% длины) и донная (5...7% длины) части являются отходами.

Строение слитка кипящей стали значительно отличается от строения слитка спокойной стали. В слитке кипящей стали в верхней части нет сосредоточенной усадочной раковины, но много газовых пузырей, расположенных у поверхности и в глубине. Для слитков кипящей стали характерны более выраженная неоднородность в распределении примесей и более высокое их содержание.

Стальные слитки подвержены некоторым дефектам: раковины (усадочные и газовые), усадочная пористость и газовые пузыри, неоднородность в распределении примесей — углерода, серы, фосфора и газов (ликвация), поперечные и продольные трещины, повышенное содержание неметаллических включений (оксиды, сульфиды,

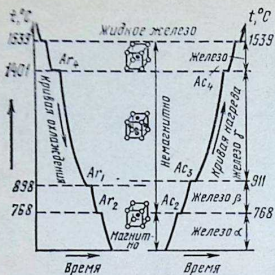


Рис. 1.11. Кривые охлаждения и нагревания железа.

силикаты) и вредных газов (водород, азот, кислород).

§ 6. Аллотропические превращения

Все металлы можно разделить на металлы, не испытывающие превращений при

нагревании и охлаждении в твердом состоянии (медь, алюминий, магний, свинец и др.), и металлы, претерпевающие такие превращения, которые называют *аллотропическими* (железо, олово, титан, кобальт и др.).

В результате аллотропического превращения атомы кристаллического тела, имеющие решетку одного типа, перестраиваются таким образом, что образуется кристаллическая решетка другого типа. Аллотропические формы металла называют *модификациями* и обозначают начальными буквами греческого алфавита (α , β , γ , δ и т. д.). Модификацию, устойчивую при низкой температуре, обозначают буквой α , при более высокой — β , следующие (по температурной шкале) модификации — γ , δ и т. д.

Известны аллотропические превращения для металлов: $\text{Fe}_\alpha \rightleftharpoons \text{Fe}_\gamma$; $\text{Co}_\alpha \rightleftharpoons \text{Co}_\beta$; $\text{Ti}_\alpha \rightleftharpoons \text{Ti}_\beta$; $\text{Mn}_\alpha \rightleftharpoons \text{Mn}_\beta \rightleftharpoons \text{Mn}_\gamma \rightleftharpoons \text{Mn}_\delta$; $\text{Sn}_\alpha \rightleftharpoons \text{Sn}_\beta$ и др.

Аллотропические превращения железа можно проследить по кривым охлаждения и нагревания (рис. 1.11). На кривой охлаждения большая остановка температуры при 1539 °С соответствует переходу железа из жидкого состояния в твердое (первичная кристаллизация). При этом выделяется значительное количество тепла. Образующиеся кристаллы Fe_δ имеют кристаллическую решетку ОЦК со стороной $a = 2,93$ Å. Вторую, более короткую остановку наблюдают при 1401 °С (точка Ar_4). При этом Fe_δ переходит в Fe_γ , которое имеет кристаллическую решетку ГЦК с параметром 3,64 Å. Третья остановка происходит при 898 °С (точка Ar_1). Здесь Fe_γ переходит в Fe_α , которое имеет кристаллическую

решетку ОЦК с параметром 2,90 Å. Следующую остановку наблюдают при 768 °С (точка A_{r2}), что соответствует переходу Fe_{β} в Fe_{α} без изменения типа кристаллической решетки, уменьшается лишь параметр с 2,90 до 2,88 Å.

Таким образом, фактически имеются две модификации железа с разными типами кристаллической решетки: $Fe_{\alpha(\beta,\delta)}$ — ОЦК; Fe_{γ} — ГЦК.

Превращения, имеющие место при охлаждении, сопровождаются выделением тепла, а превращения, происходящие при нагревании, — поглощением тепла. Остановки чаще всего происходят при тех же или несколько более высоких температурах, чем при нагревании.

Температуры, при которых происходят аллотропические превращения, называют критическими и обозначают буквой A (от французского слова *arrêt* — остановка). Если превращение происходит при нагревании, то добавляют индекс c (*choffage* — нагревание), при охлаждении — r (*refroidissement* — охлаждение).

§ 7. Магнитные превращения

Наряду с аллотропическими превращениями в сплавах, обладающих магнитными (ферромагнитными) свойствами, встречаются магнитные превращения. Они заключаются в том, что ферромагнитный металл или сплав при некоторой температуре становится слабомагнитным («теряет магнетизм»). Ранее такие превращения не отличали от аллотропических из-за схожести их проявления. Более тщательные исследования показали, что при магнитных превращениях не происходит перестройка кристаллической решетки, она остается неизменной. Существует еще ряд особенностей, отличающих магнитные превращения от аллотропических.

Магнитные свойства постепенно падают при приближении к точке превращения. Эта точка не соответствует

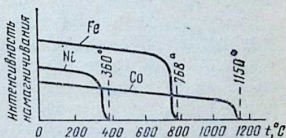


Рис. 1.12. Магнитные свойства железа, никеля и кобальта в зависимости от температуры.

скачкообразному изменению свойств. Магнитное превращение не имеет температурного гистерезиса. Механические и некоторые физические свойства при этих превращениях не изменяются. Изменяются электрические, магнитные и тепловые свойства.

Согласно современным представлениям, при магнитных превращениях происходит изменение во взаимодействии высших электронных оболочек атомов.

Полная потеря ферромагнитных свойств происходит при определенной температуре, называемой *точкой Кюри* (рис. 1.12).

Глава II. ПРОИЗВОДСТВО ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

§ 1. Выплавка чугуна

Выплавка чугуна в доменных печах — сложный комплекс трудоемких производственных процессов. Для получения доменного чугуна используют шихту, состоящую из железных и марганцевых руд, флюсов, флюсованного агломерата, окатышей и топлива. От качества подготовки сырых материалов при дроблении, сортировке, обогащении, окусковании зависит и качество выплавленного чугуна.

Железные и марганцевые руды состоят из рудного минерала, пустой породы и примесей. Рудным минералом называют природные химические соединения железа и марганца, чаще всего окислы. Пустая порода может иметь различный химический состав. В доменной печи она плавится и переходит в шлаки. В зависимости от количества пустой породы железные руды разделяют на богатые железом (45...70%) и бедные. Богатые руды после дробления и сортировки направляют непосредственно в плавку, а бедные подвергают обогащению (увеличение относительного количества окислов железа).

Для выплавки чугуна применяют красный, бурый, магнитный и шпатовый железняки, комплексные руды. Красный железняк (гематит) содержит 55...70% железа в виде безводного окисла железа Fe_2O_3 . Остальное — примеси и пустая порода в виде кварцита. Бурый железняк содержит 35...55% железа в виде водных

окислов и чаще в виде лимонита. Остальное — примеси (фосфор) и пустая порода песчано-глинистого происхождения. Магнитный железняк (магнетит) содержит 50...69% железа в виде окисла железа Fe_3O_4 . Пустая порода — кремнезем. Шпатовый железняк (сидерит) содержит 30...40% железа в виде углекислой соли $FeCO_3$. Пустые породы — кремнезем, глинозем и небольшое количество окиси магнезия. К комплексным рудам относят хромоникелевую железную руду (бурый железняк с 35...40% Fe, примесью хрома и никеля); ванадистые титаномагнетиты (магнетит Fe_2O_3 , ильменит $FeO \cdot TiO_2$ и окисел ванадия VO_3); хромистый железняк (хромит $FeO \cdot CrO_3$).

Марганцевые руды в доменном производстве применяют с содержанием марганца 25...40%. Пустая порода этих руд — обычно глинистый песок.

В доменную печь загружают также некоторое количество металлургических отходов: колошниковую пыль, металлический скрап, передельные шлаки сталеплавильного производства с повышенным содержанием марганца, окалину прокатного и кузнечного производства и сварочные шлаки.

Топливом в доменном производстве служат кокс, древесный уголь и природный газ. Топливо играет очень важную роль. Горение угля создает высокую температуру, необходимую для восстановления руд, плавления и перегрева образующихся чугуна и шлака. Часть углерода топлива используется в химических реакциях при восстановлении железа.

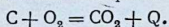
Флюсы используют для получения шлаков нужной основности, так как в пустой породе и топливе преобладает кремнезем. Флюсами служат известняк ($CaCO_3$) и реже доломитизированный известняк.

Перед загрузкой в доменную печь шихту подвергают специальной подготовке, заключающейся в дроблении, промывке, просеивании, обогащении, спекании.

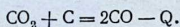
Современные доменные печи работают на *флюсованном агломерате*, в который, кроме руды и топлива, добавляют измельченный известняк. Спекание осуществляют при 1100...1200 °С на специальных агломерационных ленточных машинах, где при сгорании топлива изменяется химический состав шихты: кальций известняка при 900 °С разлагается на окись кальция и углекислый газ, сера выгорает, окись железа частично восста-

навливается до закиси, которая с окисью кремния пустой породы образует силикат железа. Он плавится и связывает другие частицы шихты. При этом образуются пористые спеченные куски материала, называемого агломератом.

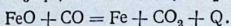
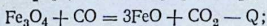
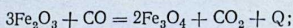
Доменную печь загружают через засыпное устройство 5 (рис. 1.13) флюсованным агломератом отдельными порциями (колошами) или слоями кокса, руды и флюса, который вводят для удаления пустой породы в шлак, снижения ее температуры плавления и сплавления с золой топлива. Через фурмы 3 (отверстия), расположенные в нижней части доменной печи (горна), подают горячий воздух, обогащенный кислородом. Вблизи фурм топливо полностью сгорает:



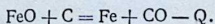
Углекислый газ, поднимаясь, соприкасается и реагирует с раскаленным коксом, переходит в окись углерода:



Окись углерода восстанавливает железо из его окислов:



Железо восстанавливается за счет углерода кокса, соприкасающегося с рудой, углерода сажи, образованного при разложении оксида углерода:



Восстановленное железо науглероживается. Образуется чугуны, каплями стекающий в нижнюю часть домны, откуда его выпускают через летку 1 (отверстие).

Пустая порода, взаимодействуя с флюсом, образует легкоплавкий шлак, скапливающийся сверху жидкого металла, который в нужный момент скачивается через летку 2.

Одновременно с восстановлением и науглероживанием железа происходит восстановление из шихты марганца, кремния и фосфора, которые также попадают в чугуны.

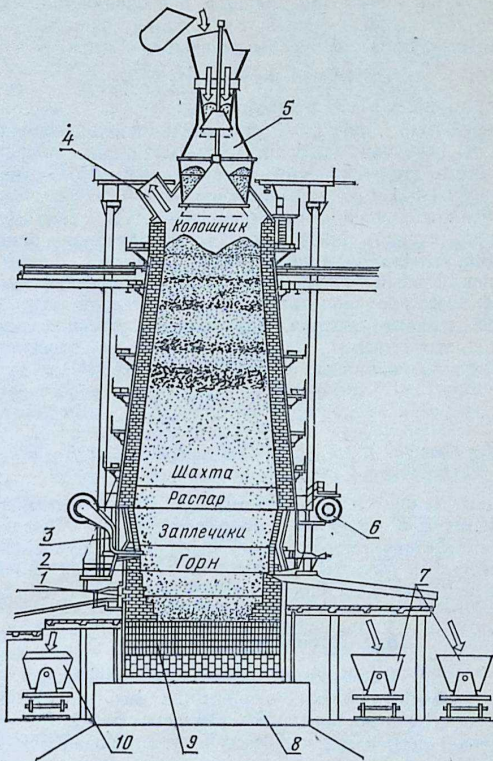
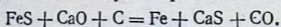


Рис. 1.13. Схема доменной печи:

1 — чугунная летка; 2 — шлаковая летка; 3 — фурменный прибор; 4 — газоотводы; 5 — засыпное устройство; 6 — воздухопровод; 7 — шлаковозы; 8 — фундамент; 9 — лещадь; 10 — чугуновоз.

Сера, присутствующая в шихте, частично уходит в газы, но значительная ее часть остается в шлаке и чугуна. При достаточно большом насыщении шлака известью (45...50%) в горне печи проходит реакция, в результате которой часть серы переходит в шлак:



В доменных печах выплавляют:

перелый чугун, составляющий 80...90% всего производства чугуна, который направляют на переработку в сталь (мартеновский чугун М-1 и М-2; бессемеровский чугун Б-1 и Б-2; томассовский чугун Т-1);

литейный чугун, составляющий 8...17% всего производства чугуна, применяют для получения отливок (ЛК-00, ЛК-0, ЛК-1 и до ЛК-5);

специальный чугун (ферросплавы), составляющий 2...3% всего производства чугуна.

Для сравнения производительности доменных печей различного объема у нас в стране принят коэффициент (K) использования полезного объема (КИПО):

$$K = V/P,$$

где V — полезный объем печи, м³; P — среднесуточная производительность печи, т.

Чем лучше печь работает, тем меньше этот коэффициент. Его значение зависит главным образом от сорта выплавляемого чугуна, содержания пустой породы в руде и качества подготовки шихты. Для большинства печей $K = 0,44...0,65$.

§ 2. Производство стали

В настоящее время сталь производят в конверторах, мартеновских и электрических печах. В качестве шихты в конверторах применяют жидкий чугун и стальной лом, в мартеновских и электрических печах — жидкий и твердый чугун со стальным ломом, иногда в электропечах — один стальной лом. В состав шихты вводят известь и некоторые другие шлакообразующие вещества, раскислители, железную руду и легирующие добавки.

Выплавку стали в конверторах осуществляют продувкой жидкого чугуна воздухом или кислородом для

удаления (уменьшения содержания) углерода, кремния, марганца, серы и фосфора.

Конвертором называют большую стальную реторту, футерованную огнеупором (при бессемеровском процессе — кислым динасом, а при томассовском — основным доломитом). В зависимости от вида футеровки перерабатываемый чугун отличается химическим составом. В том и другом случае жидкий перелдельный чугун продувают воздухом, подаваемым через отверстия в днище конвертора.

В нашей стране построен ряд конверторных цехов, оборудованных стотонными конверторами, которые успешно работают на техническом кислороде. Строят конверторные установки на 250 и 300 т.

На большинстве заводов используют глуходонные конверторы, которые футеруют смолодоломитовым или магнезитовым кирпичом. Кислород вдувают в конвертор вертикальной трубчатой водоохлаждаемой фурмой, опускаемой в горловину конвертора, но не доходящей до уровня металла на 80...120 мм. Таким образом, кислород не вдувается под зеркало металла, а подается на его поверхность. При таком способе подвода кислорода процесс идет достаточно интенсивно (рис. 1.14), что дает возможность перерабатывать чугуны с различным содержанием примесей и вводить в конвертор не только жидкий металл, но и добавлять к нему скрап и железную руду (до 30% веса металла).

Окисление примесей происходит по следующей схеме:

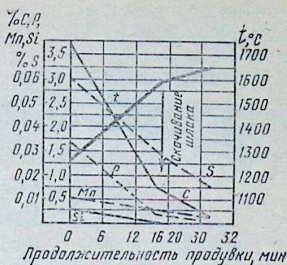
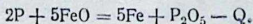
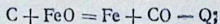
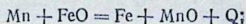
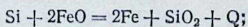
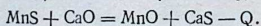
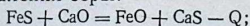


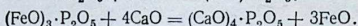
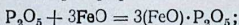
Рис. 1.14. Диаграмма выгорания примесей в кислородном конверторе.

При производстве стали важно удалить вредные примеси (сера и фосфор). Для этого в шлак добавляют известь.

Процесс удаления серы:



Процесс удаления фосфора:



Образовавшиеся соединения CaS и $(\text{CaO})_4 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ переходят в шлак и удаляются из печи.

В кислородном конвертере удается получить достаточно чистые по сере и фосфору стали, так как ход плавки в таком конвертере позволяет применять известковые шлаки. Общая продолжительность продувки кислородом составляет 18...26 мин.

Недостаток конверторно-кислородного способа — большое пылеобразование, значительно большее, чем при других способах получения стали.

Мартеновский способ пока является основным, дающим около 80% высококачественной стали, выплавляемой в мире. За последнее время доля мартеновского производства стали в СССР сократилась главным образом за счет кислородно-конверторного производства, но все же большую часть стали пока выплавляют в мартеновских печах. СССР имеет крупные мартеновские печи вместимостью 600 и 900 т. Требуемую для расплавления шихтовых материалов высокую температуру (1800 °С) создают предварительным подогревом газа и воздуха. Современные мартеновские печи в значительной степени механизированы и автоматизированы.

В зависимости от переплавляемого материала существуют две разновидности мартеновской плавки: скрап-рудный процесс и скрап-процесс. При скрап-рудном процессе шихта состоит из жидкого чугуна (60...70%), скрапа и окислителей (железная руда, марганцевый концентрат). При скрап-процессе используют преимущественно стальной лом (до 70%) и чушковый передельный чугун.

Флюсами в основной печи служат известняк, плавиновый шпат и боксит, в кислой — кварцевый песок, шамотный бой и др.

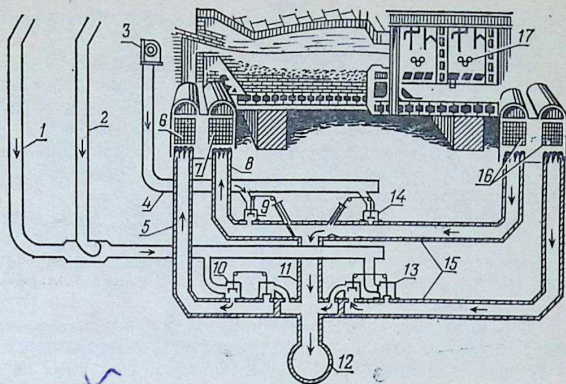


Рис. 1.15. Схема устройства и работы мартеновской печи вместимостью 500 т:

1 — канал для подачи газа; 2 и 4 — каналы для подачи воздуха; 3 — вентилятор; 5 и 8 — каналы для подачи смеси газа и воздуха; 6, 7 и 16 — регенераторы; 9, 10, 13 и 14 — клапана; 11 и 15 — каналы для отвода продуктов горения в трубу; 12 — труба; 17 — завалочные окна.

Мартеновская печь работает следующим образом (рис. 1.15). Газ и воздух по каналам 1 и 2 подводят к газовому клапану 13, а затем их смесь по каналу 5 поступает в регенератор 6. Вентилятор 3 по каналу 4 нагнетает воздух к воздушному клапану 9, от которого он по каналу 8 поступает в регенератор 7.

Насадка регенераторов, нагретая до 1500...1550 °С, отдает тепло проходящим через нее газу и воздуху. Нагреваясь в регенераторах до 1200 °С, газ и воздух по вертикальным каналам поступают в головки печи для образования газозвушной смеси, которая сгорает в рабочем пространстве. Продукты горения идут из рабочего пространства печи через правые головки в регенераторы 16 и по каналам 15 и 11 поступают в трубу 12. Когда огнеупорная насадка в регенераторах 6 и 7 начинает остывать, направление движения газа и воздуха меняется. Клапаны 9 и 10 закрываются, а 13 и 14 открываются. При этом тепло отходящих продуктов горения нагревает насадку регенераторов 16 до 1200...1300 °С. После перекидки клапанов продукты горения пойдут через насадку регенераторов 6 и 7. Большинст-

во мартеновских печей работает на смеси природного газа и мазута.

Шихтовые материалы (скрап, чугуны, флюсы) загружают в печь через завалочные окна 17. Разогрев шихты, сплавление и нагрев металла и шлака происходят при контакте материалов с факелом горящих газов. Готовую сталь выпускают через отверстие, расположенное в самой низкой части подины печи. На время плавки это отверстие забивают огнеупорной глиной.

Процесс плавки может быть кислым или основным. Это зависит от вида футеровочного материала. При кислом процессе применяют динасовый кирпич, при основном — магнезитовый кирпич (для свода — хромомагнезитовый).

В период плавки шихты кремний, марганец, железо, фосфор окисляются сначала кислородом, содержащимся в печных газах и руде, а затем (после образования первичного шлака) закисью железа, растворенной в шлаке. Окисление идет примерно по той же схеме, что и при конверторном производстве. Общая продолжительность плавки зависит от емкости печи и условий производства и находится в пределах 6...12 ч.

Основные технико-экономические показатели работы мартеновских печей — удельный расход топлива на 1 т выплавляемой стали и суточный съем стали с 1 м² пода печи. Необходимое количество теплоты для выплавки стали составляет 3...6 МДж/кг. В мартеновских печах сжигают условного топлива до 10...20% массы выплавляемой стали. Средний съем стали на отечественных металлургических заводах составляет 9 т/м², а на некоторых — 10...14 т/м². Развитие скоростных методов сталеварения увеличивает съем стали и производительность печей.

В настоящее время наиболее совершенными сталеплавильными агрегатами являются электрические печи, в которых источником энергии для получения тепла и плавления металла служит электрическая энергия.

В электропечах можно получать температуру до 2000 °С, а следовательно, расплавлять тугоплавкие компоненты шихты (хром, никель, титан и др.); использовать высокоосновный шлак (до 55...60% CaO); создавать восстановительную атмосферу или вакуум (в индукционных печах) и хорошо раскислять и дегазировать металл.

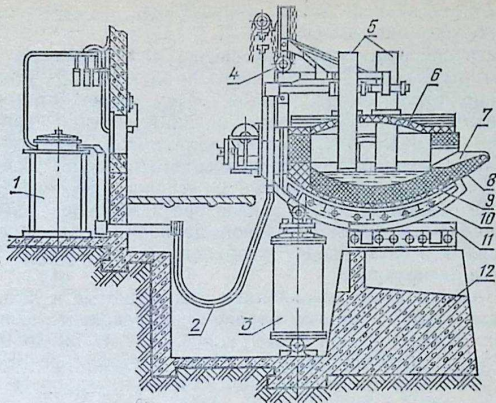


Рис. 1.16. Устройство дуговой электропечи вместимостью 30 т.
 1 — понижающий трансформатор; 2 — гибкий кабель; 3 — механизм наклона печи; 4 — механизм для закрепления и перемещения электродов; 5 — электроды; 6 — арочный свод; 7 — желоб для выпуска стали; 8 — подина; 9 — стальной кожух; 10 — опорные сегменты; 11 — направляющие фундамента; 12 — фундамент.

Существуют два вида печей для электроплавки стали: дуговые и индукционные. Наиболее широко применяют первые (рис. 1.16). Печь состоит из цилиндрического сварного или клепаного кожуха 9 со сфероидальным днищем, подины 8 с огнеупорной футеровкой стенок, съемного арочного свода 6 с отверстиями для электродов 5, механизма 4 для закрепления и вертикального перемещения электродов, двух опорных сегментов 10 для поддержки и перемещения печи по направляющим фундамента 11, механизма 3 для наклона печи при выпуске стали по желобу 7. Электроэнергию подают от трансформатора 1, расположенного в отдельном помещении, по медным шинам и гибкому кабелю 2.

В печи применяют угольные или графитированные электроды. Во время плавки электроды сгорают, и их постепенно опускают в печь, свинчивая с новыми.

Дуговые электропечи имеют емкость от 3 до 270 т и более. На Волгоградском заводе «Красный Октябрь» ра-

ботаюте две печи по 200 т. В настоящее время проектируют более мощные печи.

Загрузку печей емкостью свыше 30 т производят через открытый свод. После загрузки электроды опускают до соприкосновения с шихтой, затем включают ток и начинают плавку. Во время окислительного периода шихта расплавляется и из металла выгорают кремний, марганец, углерод (до установленного предела) и некоторые легирующие элементы. Окисление протекает по тем же реакциям, как в конверторе и мартеновской печи. Во время восстановительного периода металл раскисляется, и в него вводят необходимые добавки, в том числе и легирующие.

В электропечах выплавляют углеродистые и легированные стали, главным образом высококачественных марок. Выход годной стали колеблется от 90 до 96% всей металлической завадки. На 1 т стали расходуют 800...900 кВт·ч электроэнергии. Продолжительность выплавки стали в дуговой печи составляет 6...8 ч и зависит от ее мощности и конструкции, выплавляемой марки стали, а также характера исходного сырья. Применение электропечей пока ограничено достаточно высокой стоимостью электроэнергии.

Электрошлаковый переплав применяют для получения сталей и сплавов особо высокого качества, недостижимого при других способах. Переплаву подвергают кованные, катаные и литые расходоуемые электроды круглого, прямоугольного, квадратного и другого сечения, сплошные и полые, монолитные и составные.

Упрощенная схема данного способа приведена на рисунке 1.17. Плавающие электроды 3 из стали в начале процесса приближают к сухарям (выступы) поддона 7. Затем подают напряжение, и между электродами и сухарями возникает электрическая дуга. За счет теплоты дуги флюс расплавляется и образуется слой шлака 6. Когда слой шлака достигает определенной толщины, электрическая дуга гаснет, и в дальнейшем тепло возникает за счет прохождения тока через слой шлака, имеющего высокое электросопротивление. Температура шлака при этом достигает 2000 °С. В перегретом шлаке металл электродов расплавляется, очищается от примесей (благодаря капельному переносу металла) и образует слой 2, быстро кристаллизующийся в водоохлаждаемом тигле 1 с формированием слитка 8.

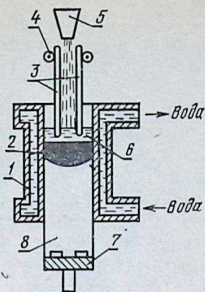


Рис. 1.17. Схема электрошлакового переплава:

1 — тигель; 2 — жидкий металл; 3 — плавящиеся электроды; 4 — крепление и механизм перемещения электродов; 5 — дозатор; 6 — слой жидкого шлака; 7 — поддон; 8 — слиток.

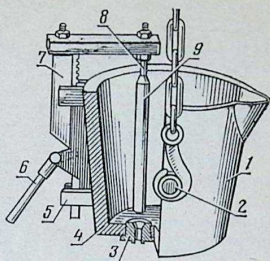


Рис. 1.18. Ковш для разливки стали:

1 — стальной кожух; 2 — цапфы; 3 — сменный стакан; 4 — огнеупорный слой из шамотного кирпича; 5, 6 и 7 — система рычагов для подъема стопора; 8 — стальной стержень стопора; 9 — футерованный стопор.

Легирующие добавки и флюсы (высокоосновные и фторидные) вводят из дозатора 5. Перегретый шлак рафинирует металл, очищая его от серы и фосфора. Содержание серы снижается на 30...50%, а других вредных примесей — в 2...3 раза. В электрошлаковом металле отсутствуют строчечные скопления неметаллических включений, структурные составляющие распределяются очень равномерно, границы зерен отличаются большой чистотой. Этим объясняется почти полное отсутствие анизотропии механических свойств.

Методом электрошлакового переплава производят стали специального назначения: шарикоподшипниковая, инструментальная и др. Плавка этим методом значительно дешевле, чем при вакуумном дуговом переплаве.

При производстве стали к концу плавки металл насыщается кислородом. Для его нейтрализации в металл вводят кремний, марганец и алюминий, которые получили название *раскислителей*. Эти элементы соединяются с кислородом значительно легче, чем углерод и железо. По степени раскисления стали делят на кипящие, спокойные и полуспокойные. Кипящая сталь практически не раскислена, и при ее разливке выделяется окись углерода (сталь кипит в изложнице). Спокойная

сталь полностью раскислена (весь кислород находится в связанном состоянии). Полуспокойная сталь занимает промежуточное положение между кипящей и спокойной сталями.

Готовую сталь выпускают из печи или конвертора в предварительно подогретый сталеразливочный ковш (рис. 1.18). Стальной кожух 1 ковша имеет две цапфы 2 для захвата крюком мостового крана. Внутри ковш футерован огнеупорным шамотным кирпичом 4. В дне ковша установлен сменный стакан с отверстием для выпуска металла. Отверстие в стакане запирают огнеупорной пробкой (стопор 9), закрепленной на стержне 8. Поднимают и опускают стопор вручную системой рычагов 5, 6 и 7.

Из ковша сталь разливают по чугунным изложницам для получения слитков. Наиболее часто их масса составляет 5...8 т.

Применяют три способа разливки стали: разливка в изложницы сверху (при получении крупных слитков); разливка в изложницы сифоном (при отливке мелких и средних слитков); непрерывная разливка. При *разливке сверху* каждую изложницу заполняют отдельно (рис. 1.19, а); при *сифонной разливке* заполняют одновременно несколько изложниц. При этом сталь из ковша 1 попадает в стояк 2 (рис. 1.19, б) и отводится из него в изложницы 4 по литниковым каналам 5, расположенным в поддоне 6. Сталь, разлитая сверху, имеет меньше неметаллических включений, чем сифонная. Однако у последней более чистая поверхность.

При затвердевании стали в изложнице происходит усадка металла и образуется усадочная раковина, которая располагается ближе к головной части слитка. Для уменьшения усадочной раковины применяют прибольные надставки 3 (рис. 1.19, б). Сталь в надставке затвердевает в последнюю очередь, что способствует уводу усадочной раковины в головную часть слитка.

При *непрерывной разливке* стали получают большую экономию металла, растет производительность труда, снижается себестоимость продукции (рис. 1.20). Сталь из ковша 1 (рис. 1.20, а) непрерывной струей поступает в разливочное устройство 2 и далее в охлаждаемый проточной водой кристаллизатор 3. В кристаллизатор снизу закладывают затравку. При соприкосновении с затравкой и стенками кристаллизатора металл быстро засты-

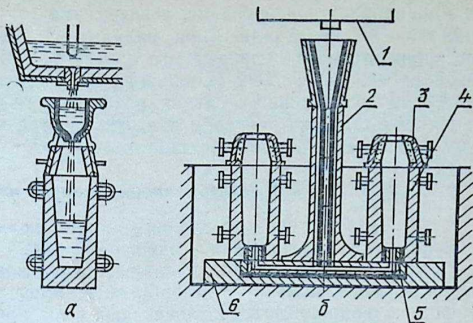


Рис. 1.19. Разливка стали в изложницы сверху (а) и сифоном (б):
 1 — разливочный ковш; 2 — центральный стояк; 3 — прибыльная надставка; 4 — изложница; 5 — литниковый канал; 6 — поддон.

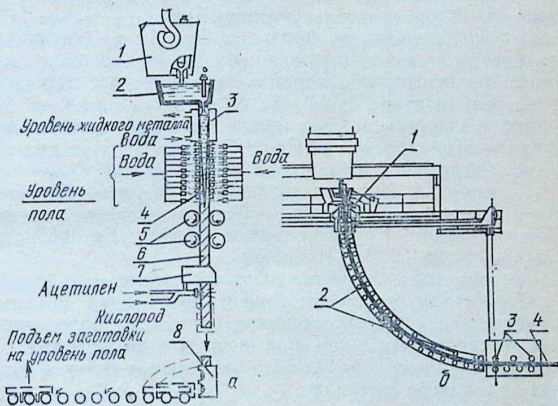


Рис. 1.20. Схема установок для непрерывной разливки стали:
 а — с вертикальной осью затвердевающей заготовки: 1 — ковш; 2 — разливочное устройство; 3 — кристаллизатор; 4 — зона вторичного охлаждения; 5 — тянущие валки; 6 — слиток; 7 — газорез; 8 — кантователь. б — с криволинейной (радиальная) осью затвердевающей заготовки: 1 — кристаллизатор; 2 — ролики вторичного охлаждения; 3 — валки правильно-тянущего устройства; 4 — слиток.

ваит и приваривается к затравке, а затем вместе с ней вытягивается из кристаллизатора валками 5. Затвердевание формируемого непрерывного слитка ускоряется при проходе его через зону вторичного охлаждения 4. Окончательно затвердевший слиток разрезают газорезкой 7, укладывают кантователем 8 на рольганг и подъемником перемещают на уровень пола.

§ 3. Прямое восстановление железа из руд

Прямым восстановлением можно получить железо в виде губки, крицы и жидкого металла.

Губку (губчатое железо) получают с использованием твердых (уголь, коксик) и газообразных (смесь окиси углерода и водорода) восстановителей. Этот процесс осуществляют в трубных или шахтных печах при 950...1000 °С. При такой температуре восстановленное железо и пустая порода не плавятся. Полученный продукт дробят, а затем губчатое железо отделяют от пустой породы магнитной сепарацией. Губка получается в виде кусочков, окатышей или порошка и содержит до 90% железа, которое используют при производстве стали.

Крицу (кричное железо) получают во вращающихся трубчатых печах. Загруженная шихта, состоящая из смеси руды, твердого топлива и известняка, движется навстречу потоку горячих газов, образующихся от сгорания пылеугольного топлива в противоположном конце печи. Температура в печи 1250...1300 °С. При этом из железной губки выплавляется закись железа и частично пустая порода. Полученный продукт сваривается в крицу. Ее после охлаждения дробят и подвергают магнитной сепарации. Крица содержит 90...95% Fe; 0,5...1,5% С; 0,2...1% S; 0,2...1% P и шлак.

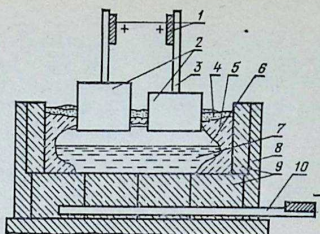
В настоящее время разработаны процессы получения *жидкой стали* непосредственно из руд, минуя доменное производство. В этих процессах применяют более высокие температуры, чем при производстве губчатого и кричного железа, в результате чего железо и шлак доводят до жидкого состояния.

§ 4. Производство алюминия и меди

Цветная металлургия — одна из ведущих отраслей промышленности. Руды цветных металлов значительно беднее железных. Если, например, медные ру-

Рис. 1.21. Устройство электролизной ванны:

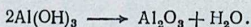
1 — медные шины; 2 — аноды; 3 — стальной стержень; 4 — глинозем; 5 — твердый электролит; 6 — расплавленный криолит; 7 — жидкий алюминий; 8 — стальной кожух; 9 — угольные блоки; 10 — медные шины.



ды содержат 0,5...2% меди, то ее выплавку считают уже экономически выгодной. Руды цветных металлов, как правило, полиметаллические. Технология переработки таких руд требует извлечения из них всех цветных металлов.

Процесс производства алюминия состоит из трех самостоятельных этапов: выделение из алюминиевых руд чистого глинозема Al_2O_3 ; получение алюминия электролизом расплавленного глинозема; рафинирование полученного алюминия.

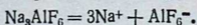
Чистый глинозем выделяют различными способами, из которых наиболее распространен щелочной. При этом глинозем, входящий в состав руды, обрабатывают щелочами и он связывается в алюминат натрия $Al_2O_3 \cdot Na_2O$, который переходит в водный раствор. Отделенный от шлака раствор алюмината натрия при определенных условиях разлагается с выделением в осадок гидроксида алюминия $Al(OH)_3$, который отфильтровывают, прокаливают, и образуется чистый глинозем:



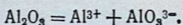
Электролиз глинозема производят в жидком криолите при температуре около $950^\circ C$. Чистый глинозем плавится при температуре $2050^\circ C$, а с криолитом образует относительно легкоплавкий электролит (расплавленный криолитфторид алюминия и натрия Na_3AlF_6).

Для электролиза глинозема применяют электролизные ванны (рис. 1.21). Кожух 8 ванны прямоугольной формы выложен угольными блоками 9. В дно ванны вмонтированы толстые медные стержни 10 (катоды), соединенные с отрицательным полюсом источника тока. Сверху в ванну опущены угольные электроды 2 (ано-

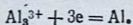
ды), соединенные с медными шинами 1 стальными стержнями 3. Электроды соединены с положительным полюсом источника тока. Под действием электрического тока в расплавленном криолите идет реакция:



Растворенный в криолите глинозем диссоциирует на ионы:



Образовавшиеся положительные ионы алюминия переносятся электрическим током к угольной подине (катод), где выделяется жидкий металлический алюминий:



Электролизер работает непрерывно. По мере надобности сверху порциями загружают глинозем. Криолит в процессе электролиза практически не расходуется. Жидкий алюминий 7 постепенно накапливается под слоем криолина 6 на подине ванны, откуда его выбирают специальными устройствами через 3...4 сут работы ванны.

Электролизные ванны соединяют последовательно по 80...100 штук. Работают они при напряжении 4...4,3 В и токе 40 000...100 000 А.

Полученный алюминий содержит примеси, ухудшающие его свойства. Для очистки алюминий продувают хлором, отстаивают в ковшах и печах, производят электролитическое рафинирование.

При производстве меди используют руды, в которых присутствуют сульфиды CuS , Cu_2S . Это медный колчедан, содержащий халькопирит $\text{CuS} \cdot \text{FeS}$; медный блеск, содержащий халькозин Cu_2S . Содержание меди в рудах мало и составляет 0,5...5%. В самородном состоянии медь встречаются редко.

Медь из руд чаще извлекают пирометаллургическим способом и реже — гидрометаллургическим.

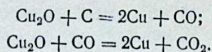
Пирометаллургический способ состоит из обогащения, обжига, плавки на штейн, продувки в конверторе и рафинирования. Обогащение производят методом флотации, сущность которого в следующем. Руду измельчают, загружают в флотационную машину, в которую предварительно помещают воду, реагенты и пенообразующие вещества. Полученную смесь продувают воздухом. От-

деление частиц пустой породы от частиц, содержащих медь, происходит за счет различной смачиваемости их водой. Частицы, богатые медью, не смачиваются и удаляются вместе с пузырьками пены. Получаемый медный концентрат содержит 10...35% меди.

Концентрат подвергают обжигу в вертикальных многоподовых печах, а также в печах с кипящим слоем. В результате обжига образуется огарок, используемый для получения черновой меди.

После обжига медный концентрат подвергают плавке на штейн, представляющий собой сплав, содержащий в основном сульфиды меди и железа (Cu_2S и FeS). Штейн содержит 20...50% меди, 20...40% железа, 22...25% серы, около 8% кислорода и примеси никеля, цинка, свинца, золота и серебра. Чаще всего плавят концентрат в пламенных отражательных печах.

Черновую медь получают продувкой штейна в конверторе. При этом температура достигает 1200...1300°C за счет химических реакций. Эта операция позволяет окислить сульфид железа за счет кислорода воздуха. Черновую медь, содержащую 0,5...1,5% примесей (золото, серебро, свинец, сурьма и др.), разливают на чушки или (при наличии миксера) подают в жидком виде на огневое рафинирование (очистка). Рафинирование состоит в окислении примесей. Получаемые окислы улетучиваются и шлакуются. После скачивания шлака медь восстанавливают «дразнением». В металл вводят сырые, а затем сухие деревянные бревна и ими перемешивают жидкую медь. Газы, выделяющиеся из дерева, восстанавливают медь и способствуют удалению сернистого газа:



Полученную медь разливают на слитки или анодные пластины для электролиза. После огневого рафинирования медь содержит не более 0,5% примесей.

При электролитическом рафинировании получают медь более высокой чистоты и извлекают золото, серебро, селен, теллур и другие примеси.

Глава I. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Формы для заливки металла бывают разовые и постоянные. *Разовые формы* годны только для одной заливки. Их получают в опоках при набивке и уплотнении формовочных смесей, при заливке формовочных смесей, по выплавляемым моделям (оболочковые формы). *Постоянные формы* из металла выдерживают обычно несколько тысяч заливок. Кроме разовых и постоянных, существуют еще *полупостоянные формы* из шамота, графита, металлокерамики. В таких формах можно изготовить несколько десятков отливок, например тяжеловесные крупные плиты, изложницы, станины для станков и др.

§ 1. Литейный модельный комплект

Модельный комплект — совокупность оснастки и приспособлений, предназначенных для получения определенной отливки. Комплект состоит из модели отливки или шаблонов для изготовления форм, моделей элементов литниковой системы, одного или нескольких стержневых ящиков, модельных или подмодельных плит и т. д.

Модель — приспособление, при помощи которого в литейной форме воспроизводят контур будущей отливки. Модели изготавливают из самых разнообразных материалов. Наиболее часто используют металл и дерево. В серийном и массовом производствах применяют металлические модели (алюминиевые, из медных сплавов и чугуна), а в индивидуальном и мелкосерийном — деревянные (из сосны, ольхи, бука, березы и липы с влажностью не более 10%).

Для предупреждения коробления деревянные модели изготавливают из нескольких слоев досок так, чтобы волокна располагались под углом одни к другим. Поверхности моделей для предохранения от влаги и уменьшения прилипания к ним формовочной смеси покрывают нитролаком. Деревянные модели маркируют красками

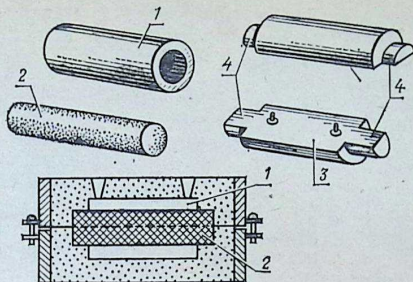


Рис. 2.1. Модель с литейными знаками:

1 — отливаемая деталь; 2 — стержень; 3 — модель; 4 — знаки.

в зависимости от изготавливаемых по ним отливок: красный цвет — чугунное литье, синий — стальное литье, желтый — отливки из цветных металлов.

Модели, служащие для отливки деталей с внутренними полостями, имеют на концах выступы (знаки). Знаки необходимы для образования в форме углублений, которые служат опорой для укладывания стержня. Знаки окрашивают в черный цвет (рис. 2.1).

В зависимости от применяемых для литья сплавов все размеры модели делают больше, чем у отливки, на величину литейной усадки (линейной или объемной). Под литейной линейной усадкой понимают относительную разницу в размерах модели и изготовленной по ней отливки:

$$\epsilon_{л} = \frac{l_{м} - l_{о}}{l_{м}} 100,$$

где $\epsilon_{л}$ — линейная усадка, %; $l_{м}$ — длина модели; $l_{о}$ — длина отливки.

Примерная литейная свободная усадка (%) для разных сплавов: серый чугун — 1...1,3, сталь углеродистая — 2...2,5, бронзы безоловянистые — 2,3...2,5, бронзы оловянистые — 1,4...1,6, латуни — 1,3...1,8, высококремнистые алюминиевые сплавы — 0,9...1,2.

Для облегчения выемки частей модели из формы боковые поверхности их делают не перпендикулярными к плоскости разреза, а с формовочным уклоном. Этот

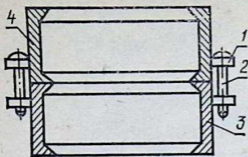


Рис. 2.2. Формовочные опоки:
1 — крепежные ушки; 2 — крепежный болт; 3 — нижняя опока; 4 — верхняя опока.

уклон равен $1...3^\circ$ у деревянных моделей и $1...2^\circ$ у металлических.

По конструкции модели бывают разъемные, неразъемные, с отъемными частями и специальные (скелетные и шаблонные).

Модели должны иметь припуск на обработку отливки в тех местах, где имеется условный знак обработки.

Стержневые ящики служат для изготовления песчаных стержней. В индивидуальном и мелкосерийном производстве применяют деревянные стержневые ящики, а в серийном и массовом — металлические (из алюминиевых сплавов). В зависимости от размеров и формы стержней ящики бывают цельные, разъемные и с отъемными частями. Как и модели, их изготовляют с учетом литейной усадки и припусков на механическую обработку. Их рабочая поверхность должна быть гладкой и окрашенной. Иногда для изготовления стержней вместо стержневых ящиков используют шаблоны.

Модельная плита — металлическая гладкая или со сложным разъемом плита с закрепленными на ней моделями отливки и элементами литниковой системы. Применяют преимущественно при машинной формовке.

Подмодельная плита из дерева или металла служит для установки на нее модели отливки и модели литниковой системы при ручной формовке. Такая плита бывает с гладкой поверхностью и фигурными углублениями, соответствующими выступающим частям неразъемной модели.

Формовочные шаблоны (протяжные и вращения) применяют для изготовления форм и реже стержней. Шаблоны вращения используют при изготовлении форм для получения отливок — тел вращения. Протяжные шаблоны применяют при изготовлении форм, имеющих прямолинейные и реже криволинейные очертания.

Модели элементов литниковой системы служат для образования в форме каналов, по которым жидкий металл подходит к полости формы и питает отливку в процессе ее кристаллизации.

Опоками называют чугунные, стальные и алюминиевые ящики, в которые набивают земляные формы (рис. 2.2). В зависимости от очертаний отливок опоки могут быть круглыми, прямоугольными и фасонными. Чугунные опоки применяют при ручной формовке мелкого литья. Стальные опоки, как более прочные, применяют при машинной формовке. Очень удобны алюминиевые опоки, обладающие достаточной прочностью и легкостью. Опоки бывают цельные и разъемные. Разъемные опоки применяют в тех случаях, когда форму переносят в литейное отделение и опоку снимают с нее. Для подъема и переноса ручные опоки снабжены скобами, а крановые — цапфами. Для центрирования и скрепления на двух боковых стенках опок выполнены приливы с отверстиями, в которые вставляют штыри.

§ 2. Формовочный инструмент

Формовочный инструмент весьма разнообразен (рис. 2.3). Лопаты *а* применяют для вскапывания земли и наполнения формы, сита *б* — для просеивания земли, ручные *в*, пневматические *г* и электрические трамбовки — для уплотнения земли в опоках, плоские, цилиндрические и угловые гладилки *ж* — для выравнивания поверхности формы после удаления из нее модели, ланцеты *д* — для подрезания земли и вырезания каналов, крючки *е* — для удаления из формы осыпавшейся земли, подъемы *з* — для извлечения металлических моделей из формовочной земли, душники (длинные иглы) — для накола формы с целью увеличения газопроницаемости; щетки из конского волоса *и* — для очистки моделей, формы и др.

Формовочный инструмент условно делят на две группы: инструмент для наполнения опок и стержневых ящиков формовочной или стержневой смесью и последующего ее уплотнения (лопаты, ручные и пневматические трамбовки, линейки); инструмент для извлечения модели из полости формы и отделки поверхности формы и стержней (крючки, подъемники, ланцеты, гладилки, щеточки).

§ 3. Формовочные и стержневые смеси

Материалы, применяемые для изготовления разовых песчано-глинистых и некоторых других литейных форм и стержней, называют формовочными.

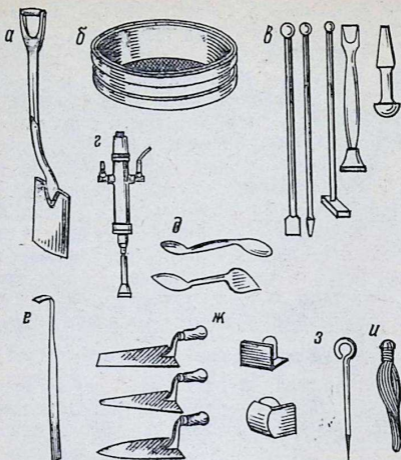


Рис. 2.3. Формовочный инструмент:

а — лопата; б — сито; в — ручные трамбовки; г — пневматическая трамбовка; д — ланцеты; е — крючок; ж — гладилки плоские, угловые; з — подъем; и — щетка.

В литейном производстве применяют большое количество разнообразных формовочных и стержневых смесей, которые должны иметь определенные свойства.

Пластичность — способность легко воспринимать и отчетливо сохранять форму (хорошо формоваться).

Прочность — способность сохранять форму при воздействии внешних сил (толчки, сотрясения, ударное действие заливаемого металла).

Податливость — способность не препятствовать усадке при охлаждении отливки. Если смесь не будет достаточно податливой, то возможны трещины в отливке, особенно между выступами. Лучшей податливостью обладает крупный окатанный речной песок. Глина ухудшает податливость. Для улучшения податливости в формовочные смеси добавляют опилки, торф.

Огнеупорность — способность смеси противостоять местному перегреву от заливаемого в форму металла. Формовочные и стержневые смеси не должны сплав-

ляться или размягчаться от соприкосновения с расплавленным металлом и пригорать к поверхности отливки. Кварцевый песок и белая глина имеют высокую огнеупорность.

Газопроницаемость — способность смеси хорошо пропускать пары воды и газы, образующиеся при соприкосновении горячего металла с влажными формами. Если газопроницаемость смеси недостаточна, то в отливках образуются газовые раковины. Хорошая газопроницаемость — у смеси на крупном речном песке. Глина ухудшает газопроницаемость.

Долговечность — способность смеси сохранять рабочие свойства при повторном использовании.

Главные составные части формовочных смесей — песок, глина (8...12%) и бывшая в употреблении горелая земля (50...90%).

Формовочные смеси разделяют на облицовочные, наполнительные и единые. Облицовочная смесь непосредственно соприкасается с металлом. Толщина слоя зависит от размеров моделей и составляет 20...50 мм. Облицовочная смесь должна обладать всеми вышеперечисленными свойствами. Наполнительные смеси служат для набивки остальной части формы. Они в первую очередь должны быть прочными и газопроницаемыми. Единой смесью набивают всю форму при машинной формовке.

Металл заливают в сырую форму или предварительно высушенную. Заливка в сырую форму непосредственно после формовки выгодна, однако не всегда возможна. Прочность сырых форм для крупного литья недостаточна, поэтому в данном случае применяют сухие формы. Для формовки в сырую применяют «тощие» смеси, содержащие до 12% глины.

При изготовлении форм с последующей их сушкой применяют полужирные и жирные формовочные смеси с 10...20% глины. Иногда в эти смеси добавляют торф или опилки, что увеличивает газопроницаемость и податливость форм.

Высушенные формы для чугунного литья покрывают изнутри формовочными красками, содержащими графит. Для стальных отливок применяют формовочные краски, содержащие порошок кварца.

В последние годы большое распространение получили быстротвердеющие формовочные смеси с жидким

стеклом, которые твердеют при продувке их углекислым газом или при выдержке на воздухе.

К стержневым смесям предъявляют более высокие требования, чем к формовочным, в отношении газопроницаемости, прочности, податливости и огнеупорности. В процессе заливки форм они находятся в более тяжелых условиях, испытывая большое термическое и механическое воздействие жидкого металла. Состав стержневых смесей выбирают в зависимости от положения стержней в форме, от их конфигурации и вида заливаемого сплава. Стержни делят на пять классов.

К первому классу относят стержни сложных очертаний с очень тонкими сечениями, имеющие небольшое число тонких знаков. Стержневая смесь содержит 100% кварцевого песка, связующим является А-1 (неорганическая группа). Стержни в форме оmyваются со всех сторон металлом.

Стержни второго класса имеют массивные части и очень тонкие ребра или выступы, развитые знаки. Значительная поверхность стержней соприкасается с металлом. Стержневая смесь состоит из 97% кварцевого песка, 3% глины, связующим служит А-2.

Стержни третьего класса — это различные центровые стержни, имеющие конфигурацию средней сложности и образующие внутренние необрабатываемые, но ответственные поверхности в отливках. Смесь состоит из 96...97% кварцевого песка, 3...4% глины, связующего группы А-3.

Для придания смеси достаточной прочности во влажном состоянии в нее вводят сульфитноспиртовую барду в количестве 2,5...3,5%.

Стержни четвертого класса имеют несложную конфигурацию, образуют внутренние обрабатываемые поверхности. Стержневая смесь содержит до 40% отработанной смеси, 56...95% кварцевого песка, 4...9% глины, 2...3% сульфитноспиртовой барды.

Массивные стержни пятого класса образуют большие внутренние полости в крупных отливках. Основным связующим веществом в смесях для таких стержней служит глина (7...10%), так как стержни мало прогреваются и органические материалы в них не сгорают и не разлагаются. В смеси добавляют опилки для увеличения податливости.

§ 4. Технология изготовления литейных форм и стержней

Формовка в двух опоках по разъемной модели — наиболее распространенный способ. На подмодельную доску 1 (рис. 2.4, а), посыпанную разделительным песком, кладут половину модели 2, имеющую формовочные уклоны на вертикальных поверхностях, и ставят нижнюю опоку 3. Модель через сито покрывают облицовочной формовочной смесью слоем 20...30 мм (рис. 2.4, б). Этот слой уплотняют руками, после чего в опоку набрасывают лопатой наполнительную формовочную смесь (рис. 2.4, в) и утрамбовывают ее. Избыток земли удаляют линейкой и в формовочной смеси душником накалывают отверстия для выхода газов (рис. 2.4, г). Этим заканчивают формовку нижней полуформы. Далее ее накрывают второй подмодельной доской и переворачивают, первую подмодельную доску снимают и поверхность разъема формы еще раз посыпают мелким разделительным песком. На заформованную часть модели накладывают вторую ее половину, направляя шипы последней в гнезда первой. Верхнюю опоку ставят на нижнюю и положение ее фиксируют штырями, которые вставляют в отверстия приливов.

Для образования литника, выпора и каналов для подвода жидкого металла к форме вставляют отдельные модели (рис. 2.4, е). Верхнюю опоку наполняют формовочными смесями в той же последовательности, как и нижнюю. Когда набивка верхней опоки закончена и проколоты отверстия для выхода газов, вынимают модели литниковой системы, снимают верхнюю полуформу, переворачивают, прорезают литниковый канал (если не устанавливалась его модель) в плоскости разъема формы и осторожно вынимают из формы половинки модели. Там, где смесь оборвалась, форму подправляют гладилками, крючками удаляют осыпавшуюся смесь и полость покрывают противопригарной формовочной краской.

В знаки нижней половины формы вкладывают стержень 7 (рис. 2.4, ж), форму собирают. Теперь она готова к заливке металла. Отливка втулки с необрубленным литником и выпором изображена на рисунке 2.4, з.

При машинной формовке механизировано уплотнение формовочной смеси и извлечение моделей из форм. В соответствии с этим формовочные машины различают

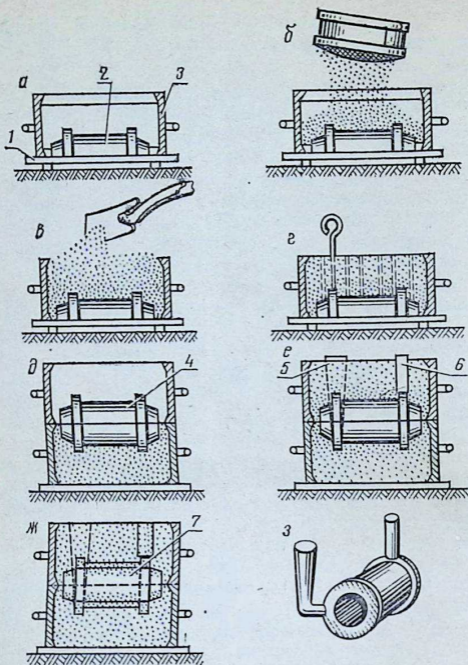


Рис. 2.4. Последовательность формовки модели втулки:

а — укладка полумодели на подмодельную доску; *б* — покрытие облицовочной смесью; *в* — засыпка и трамбовка наполнительной смеси; *г* — накальвание отверстий для выхода газов; *д* — установка верхней опоки и второй полумодели; *е* — установка элементов литниковой системы и наполнение формовочной смесью; *ж* — установка стержня и сборка формы; *з* — отливка втулки с необрубленным литником и выпором; 1 — подмодельная доска; 2 — полумодель; 3 — нижняя опока; 4 — вторая полумодель; 5 — элементы литниковой системы; 6 — выпор; 7 — стержень.

по способу уплотнения смеси (прессовые, встряхивающие и пескометы) и по способу удаления модели из формы (со штифтовым подъемом, с опускающимися плитами, с поворотной плитой и с протяжкой модели).

Прессовые формовочные машины бывают с верхним и нижним уплотнением формовочной смеси. При прес-

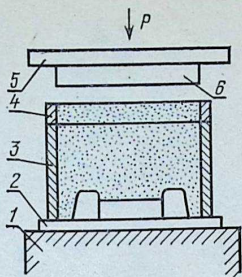


Рис. 2.5. Схема формовочной машины с верхним уплотнением формовочной смеси:

1 — стол; 2 — модельная плита с моделью; 3 — опока; 4 — наполнительная рамка; 5 — упор; 6 — прессовая колодка.

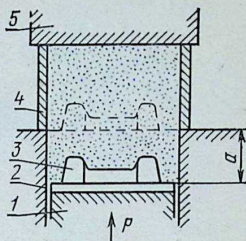


Рис. 2.6. Схема формовочной машины с нижним уплотнением формовочной смеси:

1 — стол пресса; 2 — неподвижная рамка; 3 — модельная доска с моделью; 4 — опока; 5 — упор; a — ход стола.

совании сверху (рис. 2.5) на столе 1 устанавливают модельную плиту 2 и опоку 3, на которую кладут наполнительную рамку 4. Опоку и рамку наполняют из бункера землей. Над рамкой устанавливают упор 5 с прессовой колодкой 6. После этого прессовый стол 1 поднимают и колодка 6, оставаясь неподвижной, входит внутрь наполнительной рамки, вытесняя землю в опоку. Нижняя кромка колодки в конце прессования доходит до верхней кромки опоки. В некоторых машинах прессовый стол остается на месте, а опускается упор 5.

При нижнем прессовании (рис. 2.6) стол 1 движется в направляющих, образованных неподвижной рамкой 2. Модельная плита с моделью 3 перед прессованием находится ниже плоскости, на которую устанавливают опоки 4. Вследствие этого под опокой создается запас земли. После заполнения опоки устанавливают упор 5, стол пресса поднимают и землю из рамки 2 впрессовывают в опоку. Ход стола должен точно соответствовать величине a , чтобы в конце прессования верхняя плоскость модельной доски совпала с плоскостью разъема опоки.

В наиболее распространенных встряхивающих машинах (рис. 2.7) опока 3 закреплена на подвижном столе 2, помещенном в чугунном цилиндре 4. Стол совершает возвратно-поступательное движение вверх и вниз

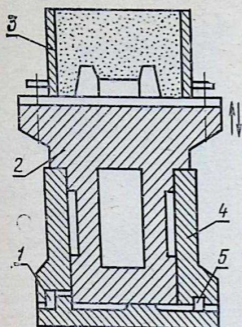


Рис. 2.7. Схема встряхивающей формовочной машины:

1 — выходное отверстие для воздуха; 2 — подвижный стол; 3 — опока; 4 — чугунный цилиндр; 5 — входное отверстие для воздуха.

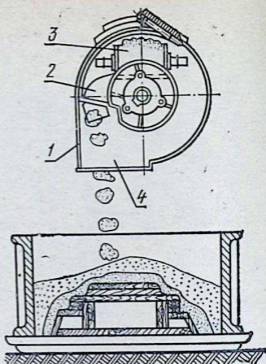


Рис. 2.8. Схема работы металлической головки пескомета:

1 — кожух; 2 — ротор с ковшом; 3 — транспортер; 4 — выходное окно.

под действием воздуха, подаваемого в отверстие 5 и выходящего через отверстие 1. Наибольшее уплотнение получается у модели, а наименьшее — на поверхности формы, что создает благоприятные условия для выхода газов.

Для формовки особо крупных полуформ применяют пескометы (рис. 2.8), состоящие из металлической головки, имеющей кожух 1, внутри которого на вал насажен вращающийся ротор со сменным ковшом 2. Транспортер 3 подает смесь в головку пескомета через окно в стенке кожуха, а вращающийся ковш подхватывает ее и с большой силой бросает в опоку или стержневой ящик через выходное окно 4. Пескомет в зависимости от модели набивает в опоки или стержневые ящики от 5 до 35 м³ смеси в час.

После окончания формовки модели на штифтовых машинах извлекают при подъеме опоки штифтами, поэтому модельная плита остается на месте. Так как кромки земли, расположенные возле модели, при подъеме находятся на весу и могут обвалиться, штифтовый подь-

ем применяют при формовке простых невысоких деталей.

В машинах с опускающимися плитами опока остается на месте, а модельная плита опускается вниз.

В машинах с поворотной плитой набитую опоку скрепляют с модельной плитой и поворачивают на 180° вокруг оси, затем опоку раскрепляют и модель извлекают, поднимая ее или опуская опоку.

Формовочные машины с протяжкой модели применяют для формовки ребристых отливок (зубчатые колеса, радиаторы, червячные колеса и др.). В этом случае опоку с уплотненной формовочной смесью оставляют на месте, а плиту с моделью, состоящей из двух частей (ребра и тело), вытаскивают, причем сначала модель ребер, а затем модель тела отливки.

При индивидуальном производстве стержни 2 простой формы цилиндрического, овального или прямоугольного сечения изготавливают в стержневых ящиках 1 (рис. 2.9). Диаметр стержня несколько больше (на величину усадки) диаметра отверстия втулки, длина стержня примерно равна длине модели вместе со знаками. Для формовки сложных отливок иногда необходимо иметь несколько разных стержней и соответственно несколько стержневых ящичков.

Технологический процесс изготовления стержней в ящике, состоящем из двух половин, включает следующие операции: очистка (обдувка) рабочей полости ящика и протирка (опрыскивание) керосином; сборка стержневого ящика и скрепление его половин; наполнение ящика стержневой смесью и уплотнение ее; раскрытие ящика и укладка стержня на драйер (сушильная плита).

Стержни в сыром состоянии имеют неудовлетворительные механические свойства. Они приобретают прочность в процессе сушки за счет вводимых в смесь крепителей. Для увеличения противопригарности поверхностей формы и стержня и для получения отливки с чистой и гладкой поверхностью применяют формовочные краски

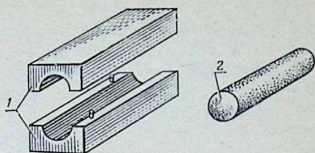


Рис. 2.9. Стержневой ящик 1 и стержень 2.

и припылы. В качестве краски для чугуна используют смесь графита с туркменской глиной и водой, для стали — смесь кварцевой муки с сульфитным щелоком, для цветного литья — смесь талька с туркменской глиной и водой. Припылом служат графит, молотый древесный уголь и кварцевая мука.

§ 5. Литниковая система

Литниковая система служит для ввода жидкого металла в форму и задерживает шлак, не допуская его в отливку.

Для производства отливок в песчано-глинистых и некоторых других формах чаще всего применяют литниковую систему (рис. 2.10), состоящую из чаши 1, стояка 2, шлакоуловителя 3, питателя (или питателей) 4 и выпора 5.

Литниковая чаша 1 служит приемником для струи металла, воспринимает ее удар и задерживает некоторое количество шлака. Сечение чаши значительно больше стояка, поэтому металл в ней на какое-то время задерживается и часть шлака успевает всплыть на поверхность.

Стояк 2 составляет продолжение литниковой чаши и служит каналом, по которому металл направляется в шлакоуловитель.

Шлакоуловитель 3 служит для вторичного отделения шлака от металла и передает металл к питателям. Его

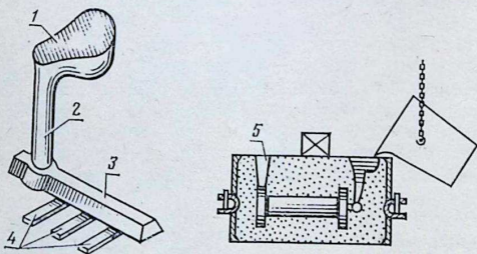


Рис. 2.10. Литниковая система:

1 — литниковая чаша; 2 — стояк; 3 — шлакоуловитель; 4 — питатели;
5 — выпор.

обычно размещают по разъему в верхней полуформе. Сечение шлакоуловителей обычно трапецидальной формы.

Питатели 4 служат для подвода металла из шлакоуловителя в полость формы и чаще всего выполняются по разъему в нижней полуформе. Они обычно имеют трапецидальное и реже круглое и овальное сечение. Подводить питатели следует к тем частям отливки, которые в дальнейшем подлежат обработке.

Отношение площадей сечения стояка, шлакоуловителя и питателя должно быть следующим: $F_{ст} : F_{шл} : F_{пит} = (1,1...1,4) : (1,05...1,2) : 1$.

Выпор 5 служит для удаления из формы газов, воздуха и загрязненной песком первой порции металла, для питания отливки жидким металлом во время затвердевания. Таким образом, выпор выполняет роль прибыли, которая служит для предупреждения усадки в теле отливки. Чем больше усадка металла, тем массивнее должна быть прибыль.

Глава II. ПОЛУЧЕНИЕ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА И ОТЛИВОК

§ 1. Плавление шихтовых материалов

При производстве чугунных и стальных отливок в качестве шихты применяют металлические материалы, топливо и флюсы. Металлическую часть шихты составляют из определенного количества литейного и передельного чугуна, чугунного и стального лома, оборотного металла (литники, брак, всплески, стружка и т. п.) и небольшого количества ферросплавов. Для расплавления шихты в вагранках сжигают кокс с добавкой природного газа и иногда антрацит. При выплавке чугуна и стали используют флюсы (известняк, плавленый шпат, доломит), которые понижают температуру плавления образующегося шлака.

При производстве отливок из цветных сплавов металлическую часть шихты составляют из первичных и вторичных металлов и сплавов. Первичные металлы производят на металлургических заводах, а вторичные металлы и сплавы получают переплавкой цветного лома и стружки в печах с последующей разливкой рас-

плавленного металла в плоские изложницы. В металлическую шихту обычно добавляют лигатуру (специально приготовленный сплав из двух или нескольких металлов).

Для получения жидкого металла в литейных цехах и участках используют различные плавильные агрегаты. Для плавки чугуна применяют вагранки, электрические индукционные печи промышленной частоты; для плавки стали — электрические дуговые печи, небольшие конверторы с боковым дутьем и мартеновские печи; для плавки цветных металлов и сплавов — различные электрические и пламенные печи.

Основным плавильным агрегатом для плавки чугуна и получения фасонных отливок служит вагранка. Ее отличают от других печей более высокий коэффициент полезного действия (0,38...0,40), большая производительность, простота конструкции (рис. 2.11). Шахта вагранки состоит из стального сварного или клепаного кожуха 8, футерованного шамотным кирпичом 10. Шахта опирается на плиту 19, а последняя — на колонны 20, стоящие на фундаменте. В плите 19 есть вырез, закрываемый во время плавки откидным дном 21 с одной или двумя подпорками. На это дно набивают формовочной смесью подину 17 через заделываемое окно 16. В нижней части вагранки в горне расположены отверстия, через которые из кольцевого воздуховода 12 по фурмам 14 вентилятор подает воздух, необходимый для горения топлива. Шихтовые материалы 9, которые постепенно измельчаются до размера, показанного позициями 11 и 15, загружают бадьей 5 при помощи крюка 3 через окно 4, шахта под которым выложена чугунными кирпичами 6 для предохранения футеровки от ударов при загрузке шихты. За загрузкой материалов наблюдают с колошниковой площадки 7. Вагранка заканчивается трубой 2 с расположенным над ней искрогасителем 1. Расплавленный чугун стекает в горн, откуда по наклонному поду и отверстию 22 идет в копильник 13. Металл выпускают через отверстие 23, а шлак — через отверстие 18. В некоторых вагранках копильники отсутствуют, и жидкий чугун скапливается в горне, откуда его периодически выпускают через летку в ковш.

Процесс плавки чугуна в вагранке состоит в следующем. В вагранку перед началом работы загружают дрова, разжигают их, а затем засыпают слой кокса на

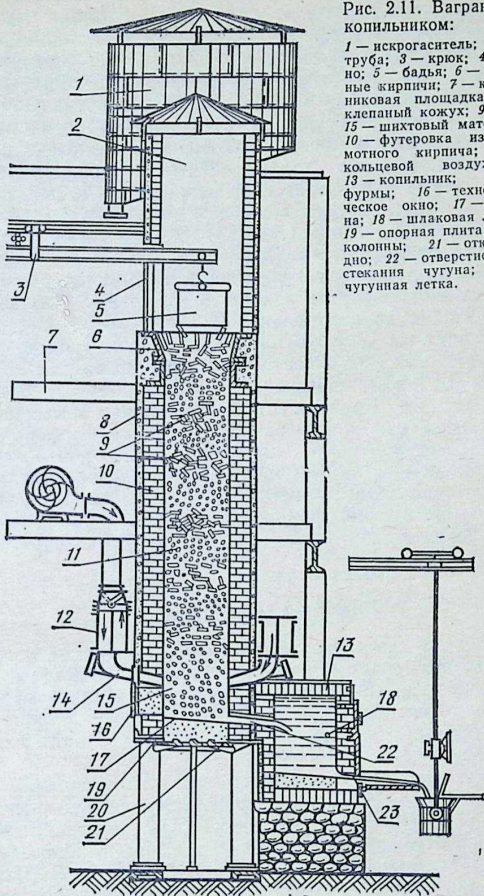


Рис. 2.11. Вагранка с копильником:

1 — искрогаситель; 2 — труба; 3 — крюк; 4 — окно; 5 — бадья; 6 — чугунные кирпичи; 7 — колошниковая площадка; 8 — клепаный кожух; 9, 11 и 15 — шихтовый материал; 10 — футеровка из шамотного кирпича; 12 — кольцевой воздуховод; 13 — копильник; 14 — фурмы; 16 — технологическое окно; 17 — подина; 18 — шлаковая летка; 19 — опорная плита; 20 — колонны; 21 — откидное дно; 22 — отверстие для стекания чугуна; 23 — чугунная летка.

700...800 мм выше уровня фурм (холостая колоша) и включают дутье. Шихтовые материалы загружают в вагранку (после разогрева ее нижней части) с помощью бадьи отдельными порциями (колошами) до самого завалочного окна. За счет тепла от сгорания кокса металлическая часть шихты плавится. Образовавшийся жидкий чугун стекает в горн, а продукты горения топлива поднимаются вверх, нагревают вышележащие слои шихты и затем удаляются через трубу. Процесс плавки чугуна в вагранке идет непрерывно, а загрузка шихты и выпуск жидкого чугуна — периодически. Производительность вагранки зависит от ее размеров и колеблется в пределах 1...30 т/ч и более.

Чтобы выплавить чугун заданного химического состава, нужно подобрать исходные материалы шихты и определить их количественное соотношение. При этом следует учитывать, что в процессе плавки происходит угар отдельных компонентов в следующих пределах: кремний 10...15%; марганец 15...20%; хром 20...30%; железо 1...1,5%. Количество серы несколько возрастает за счет выделения ее из кокса, а содержание фосфора не меняется. Углерод немного выгорает, но его количество восстанавливается за счет наличия его в коксе. Для повышения производительности вагранок и температуры выпускаемого чугуна увеличивают мощность дутья, применяют кислородное дутье, подогрев дутья, используют природный газ.

§ 2. Литейные материалы

К литейным материалам относят металлы и сплавы, применяемые для получения литых деталей и обладающие литейными свойствами, главными из которых являются жидкотекучесть, усадка, ликвация, склонность к образованию трещин и газовой пористости, легкоплавкость.

Жидкотекучесть — способность металла (сплава) в расплавленном состоянии воспроизводить рельеф полости формы. Особое значение жидкотекучесть приобретает при изготовлении тонкостенного литья. Жидкотекучесть измеряют специальной спиралью (рис. 2.12). Чем лучше жидкотекучесть сплава, тем длиннее участок, заливаемый металлом. Жидкотекучесть зависит от химического состава сплава и температуры его нагрева.

С повышением содержания углерода, кремния, марганца, никеля, фосфора в железоуглеродистых сплавах жидкотекучесть увеличивается, а с повышением содержания хрома и серы — понижается.

Усадка — уменьшение линейных и объемных размеров сплавов при затвердевании и охлаждении. В результате усадки в отливке могут образоваться коробления и трещины, а также раковины. Усадка зависит от вида и химического состава сплава и находится в пределах 0,5...3%. Для уменьшения вредных последствий усадки необходимо предусматривать прибыли, равномерно охлаждать отливки, применять формовочные и стержневые смеси с максимально допустимой податливостью.

Ликвация — неоднородность химического состава или плотности в различных частях отливки или слитка. Сплавы с большой ликвацией по плотности непригодны для изготовления отливок обычными способами. Ликвация сильно зависит от природы сплава, скорости охлаждения и применяемого способа литья.

Газовые раковины образуются в результате выделения газов при затвердевании металла. Образование газовых раковин уменьшается при применении формовочных смесей с повышенной газопроницаемостью.

Легкоплавкость — свойство металлов и сплавов плавиться при невысокой температуре. Из легкоплавких сплавов легче получить отливки.

Различают три основных вида литья: чугунное, стальное и литье из сплавов цветных металлов (цветное литье). В автотракторном и сельскохозяйственном машиностроении широко применяют все три вида литья.

Чугунное литье используют для отливки блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания тракторов и автомобилей, корпусов коробок передач, корпусов под-

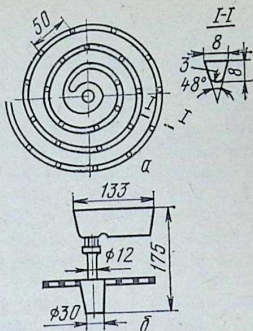


Рис. 2.12. Определение жидкотекучести металла:
а — спираль; б — литниковая система.

шипников скольжения и качения и т. п. Для этих целей используют серые чугуны. Детали, которые испытывают ударные нагрузки, изготавливают из ковкого чугуна (шестерни, рычаги, упоры, звездочки цепных передач и т. п.). Для изготовления деталей, работающих в весьма сложных условиях (например, коленчатый вал автомобиля ГАЗ-24), используют высокопрочный чугун.

Стальное литье используют для изготовления деталей, к которым предъявляют повышенные требования по прочности, пластичности и ударной вязкости. Сталь обладает меньшей жидкотекучестью, чем чугун, и требует более высокой температуры при заливке формы. Формовочные и стержневые смеси для стального литья должны обладать высокой прочностью, газопроницаемостью, податливостью и огнеупорностью.

Почти все отливки из углеродистой стали подвергают термической обработке для улучшения их микроструктуры, механических свойств и уменьшения внутренних остаточных напряжений.

Фасонное литье из углеродистых сталей по химическому составу и механическим свойствам разделяют на девять марок (15Л, 20Л, 25Л, 30Л, 35Л, 40Л, 45Л, 50Л, 55Л).

Достаточно широко применяют отливки из легированных сталей. Например, из высокомарганцевистой стали 110 Г13Л изготавливают звенья гусениц тракторов, щеки дробилок, зубья ковшей экскаваторов и др.

Цветное литье. Для производства фасонных отливок наиболее широко применяют бронзы, латуни, баббиты и алюминиевые литейные сплавы.

Бронзы бывают оловянные и специальные (безоловянные). Из оловянных используют бронзы марок Бр. ОЦС 5-5-5, Бр. ОЦС 6-6-3, Бр. ОФ 10-1 и др., а из специальных—Бр. АЖМц 10-3-1,5 и др. Бронзы применяют для изготовления отливок арматуры, зубчатых колес, подшипников, втулок и других деталей.

Специальные латуни (ЛК80-3, ЛС59-1Л и др.), содержащие различные добавки (алюминий, марганец, кремний и др.) для улучшения их литейных, механических и других свойств, используют для изготовления подшипников, втулок.

Баббиты бывают на оловянной и свинцовой основе. При изготовлении подшипников скольжения вкладыши из стали или чугуна заливают при температуре 300...

420 °С расплавленным баббитом, который образует антифрикционный слой. Лучший баббит на оловянной основе — марки Б83. Этот сплав дорогой, поэтому его (где возможно) заменяют баббитом других марок.

Литейные алюминиевые сплавы, очень широко применяемые в настоящее время, делят на пять групп.

Сплавы первой группы (АЛ2, АЛ4, АЛ9), содержащие 6...13% Si, характеризуются высокими литейными свойствами, высокой пластичностью, достаточной механической прочностью.

Сплавы второй группы (АЛ8, АЛ13), содержащие 4,5...11,5% Mg, являются высокопрочными, коррозионно-стойкими и наиболее легкими.

Сплавы третьей группы (АЛ7, АЛ12), содержащие 3...11% Cu, имеют пониженные литейные и коррозионные свойства, но обладают хорошей износостойкостью.

Сплавы четвертой группы (АЛ3, АЛЗВ, АЛ6, АЛ10В), содержащие 3...6% Si и 1...8% Cu, обладают высокой жидкотекучестью, коррозионной стойкостью и хорошей свариваемостью.

Сплавы пятой группы (АЛ16В, АЛ17В), содержащие 3...5% Si, 4...7% Zn и 2...4% Cu, отличаются хорошей прочностью и жаростойкостью, но имеют низкую жидкотекучесть и большую усадку.

§ 3. Заливка форм и получение отливок

Практика показывает, что качество литых деталей зависит как от температуры, так и от техники заливки металла.

Металл, выплавленный в печах, выпускают в ковш, из которого разливают по формам. Емкость ковша колеблется от 25 кг до 10 т и более. Ковши бывают конические, барабанные и специальной конструкции.

Отливку охлаждают в форме до температуры, которая исключает ее разрушение или образование холодных трещин. После затвердевания и охлаждения до 400...600 °С (для чугунных отливок) и 500...800 °С (для стальных отливок) отливки вручную, механизированным или гидравлическим способом выбивают из формы. Более гигиеничный и производительный — последний способ.

Отливку, освобожденную от стержней и формочной смеси, очищают вручную или механизированным

способом. Наиболее совершенна очистка отливок песком с водой в пескогидравлических установках, где одновременно с очисткой выбивают стержни.

Значительная часть стальных и некоторая часть чугунных и цветных отливок проходит термическую и химико-термическую обработку. После термической обработки стальные и некоторые другие отливки подвергают дробеструйной очистке от образовавшейся окалины.

Глава III. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТЬЯ

§ 1. Литье в металлические формы

Металлические формы (кокили) в отличие от песчаных не только не разрушаются после отливки, но даже не изменяют своей формы и первоначальных размеров, поэтому литье в металлические формы обладает определенными преимуществами: отсутствует землеприготовительное и формовочное оборудование; возможна большая скорость охлаждения, в результате чего получается мелкозернистая структура отливки с повышенными механическими свойствами; получают отливки с большой точностью размеров и хорошей чистой поверхности, что позволяет значительно снизить припуски на механическую обработку; растет производительность труда; возможно многократное использование формы.

Вместе с тем есть и существенные недостатки: металлические формы выгодны лишь при крупносерийном производстве, так как стоимость формы достаточно высокая; повышенная теплопроводность металлических форм приводит к быстрому загустению заливаемого металла, что снижает заполняемость формы и не позволяет получить отливки с тонкими стенками.

Для литья в металлические формы применяют сплавы, обладающие малой усадкой, малой способностью к образованию трещин, хорошей жидкотекучестью и малым температурным интервалом затвердевания. Металлические формы изготовляют главным образом из серого чугуна и редко из легированных сталей.

§ 2. Центробежное литье

Сущность способа состоит в заливке жидкого металла во вращающуюся металлическую форму (кокиль). Под действием центробежных сил жидкий металл прижимается к стенкам и после затвердевания точно воспроизводит контур формы (рис. 2.13).

Центробежный способ литья применяют при производстве чугунных труб, железнодорожных колес и бандажей, гильз, заготовок для поршневых колец двигателей автомобилей и тракторов.

Преимущества центробежного литья заключены в отсутствии литниковой системы, большой плотности и повышенных механических свойствах отливок.

К недостаткам относятся возможность получения отливок только формы тел вращения, трудность получения отливок с отверстием точного размера, так как диаметр отверстия зависит от количества заливаемого металла.

В практике ремонтного производства данный способ хорошо зарекомендовал себя при заливке баббитом шапунных и коренных вкладышей двигателей внутреннего сгорания и других подшипников скольжения.

Формы при центробежном литье изготавливают из чугуна и легированной стали. Внутреннюю поверхность формы смазывают смесью из 60% мазута и 40% каолина. Форму перед заливкой металлом из мерных ковшей подогревают до 300...400 °С. Скорость вращения формы устанавливают опытным путем.

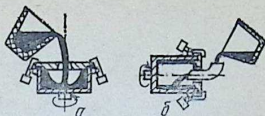


Рис. 2.13. Схема центробежного литья с вертикальной (а) и горизонтальной (б) осью вращения.

§ 3. Литье под давлением

В этом процессе для получения отливки жидкий металл под большим давлением подают в металлическую пресс-форму, где он затвердевает и охлаждается. Таким способом в массовом и крупносерийном производстве изготавливают отливки из алюминиевых, магниевых, медных и других сплавов. Масса отливок может быть от нескольких граммов (шрифты) до десятков килограммов (блоки цилиндров двигателей автомобилей). Эти отливки имеют высокое качество поверхно-

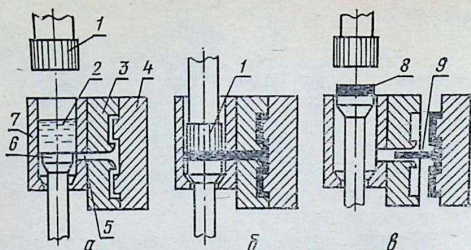


Рис. 2.14. Схема литья под давлением:

а — до начала процесса; *б* — получение отливки; *в* — извлечение отливки и пресс-остатка; 1 — пуансон; 2 — жидкий металл; 3 и 4 — пресс-формы; 5 — литник; 6 — пуансон для удаления пресс-остатка; 7 — цилиндр; 8 — пресс-остаток; 9 — отливка.

сти и весьма точные геометрические размеры. Нередко их непосредственно используют при сборке машин или только со шлифовкой отдельных базовых поверхностей.

В современной практике наиболее распространены гидравлические машины для литья под давлением с горячей или холодной (рис. 2.14) камерой прессования. Расплав 2 заливают в цилиндр 7 (позиция *а*), затем пуансон 1 давит на расплавленный металл. При этом открывается литник 5 и металл заполняет пресс-форму, состоящую из двух половинок 3 и 4, где он быстро охлаждается и застывает. Полученную отливку 9 из раскрытой пресс-формы удаляет толкатель. Пуансон 6 выталкивает пресс-остаток 8. При литье под давлением возможно образование газовых раковин из-за высокой скорости впуска расплава в полость пресс-формы и примешивания воздуха к металлу. Стоимость пресс-форм высокая.

§ 4. Литье по выплавляемым моделям

Сущность процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям состоит в следующем. Из легкоплавкого модельного состава (50% парафина и 50% стеарина) в металлической пресс-форме 1 (рис. 2.15) изготавливают модели отливок и литниковой системы. Модельный состав 2 заливают или запрессовывают под давлением 20...30 МПа в собранную пресс-

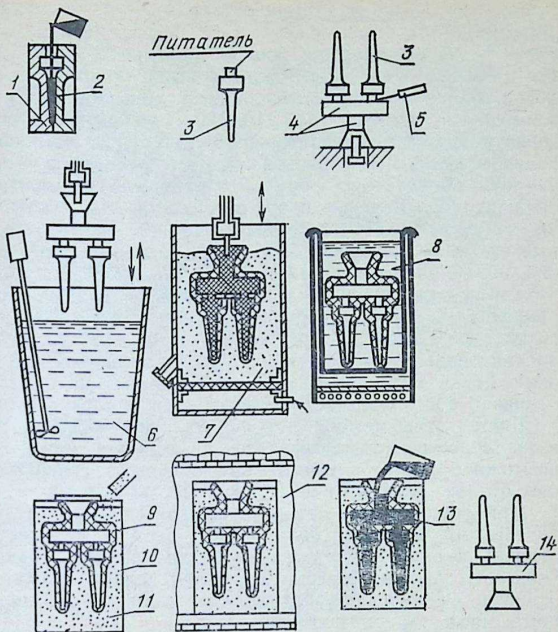


Рис. 2.15. Изготовление отливок по выплавляемым моделям:

1 — пресс-форма; 2 — модельный состав; 3 — модель; 4 — литниковая система; 5 — паяльник; 6 — облицовочное покрытие; 7 — кварцевый песок; 8 — горячая вода; 9 — пустотелая оболочковая форма; 10 — металлический ящик; 11 — кварцевый песок; 12 — электропечь; 13 — расплавленный металл; 14 — отливка.

форму. После затвердевания модель извлекают из пресс-формы. Полученные модели собирают в блоки («елки»), для чего их присоединяют к литниковой системе 4 с помощью паяльника 5. На полученный блок наносят путем окунания суспензию — жидкое облицовочное покрытие 6, состоящее из 30...40% гидролизованного этилсиликата и 60...70% пылевидного кварца. После этого «елку» обсыпают мелким сухим кварцевым песком 7 и

сушат при комнатной температуре 5...6 ч. Окунание, обсыпку и сушку повторяют несколько раз, пока на моделях не образуется огнеупорная оболочка нужной толщины (2,5...3 мм). Затем модель выплавляют из оболочки. Блоки помещают (литниковой воронкой вниз) в термошкаф с температурой 110...120 °С или погружают в горячую воду 8 с температурой 90...95 °С. После выплавления моделей и литниковой системы пустотелую огнеупорную оболочковую форму 9 помещают в металлический ящик 10. В ящик вокруг оболочки до самой воронки засыпают сухой кварцевый песок 11. Подготовленные указанным путем формы загружают в нагретую до 850...900 °С электропечь 12 и выдерживают 3...4 ч. При этом выгорает парафино-стеариновая смесь, огнеупорная оболочка твердеет, а ее рабочая поверхность становится гладкой. Вслед за прокаливанием формы заливают расплавленным металлом 13. После затвердевания и охлаждения металла отливки 14 вынимают из опок и отбивают с них керамическую оболочку.

Достоинства метода: высокая точность (5...7 класс) и хорошая чистота поверхности (5...6 класс) отливок; возможность изготовления весьма сложных и тонкостенных отливок массой от нескольких граммов до 100 кг.

Применение этого метода из-за длительности технологического процесса (более 2 сут), высокой стоимости отливок и одноразового использования формы ограничивается главным образом получением мелких сложных отливок из труднообрабатываемых сплавов в серийном и массовом производстве.

§ 5. Литье в оболочковые формы

Этим способом отливки получают в форме, состоящей из двух песчано-смоляных оболочек. Оболочковые формы и стержни делают из мелкозернистого кварцевого песка и искусственной терморезистивной смолы (связующее вещество), которая при определенной температуре необратимо твердеет.

Технологический процесс литья в оболочковые формы состоит из следующих операций. Металлическую модельную плиту (рис. 2.16, а) нагревают до 200...260 °С и покрывают разделительной смесью. Затем на плиту засыпают специальную формовочную смесь (рис. 2.16, б),

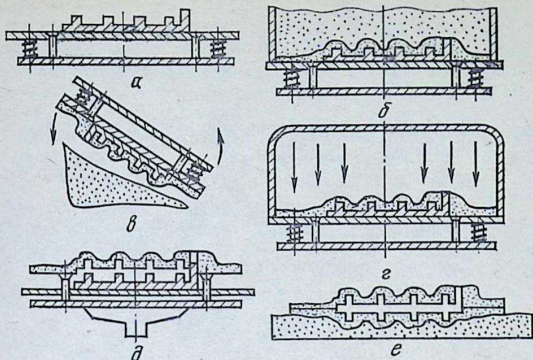


Рис. 2.16. Изготовление оболочковой формы:

а — подогретая металлическая модельная плита с полумodelью; *б* — засыпка плиты формовочной смесью; *в* — удаление лишней формовочной смеси; *г* — сушка оболочковой формы; *д* — удаление оболочковой формы с модельной плиты; *е* — соединенные две полуформы.

состоящую из кварцевого песка и 3...6% фенолформальдегидной термореактивной смолы (пудрбакелит). Под действием тепла смола плавится и склеивает песчинки, образуя на модели песчано-смоляную оболочку толщиной 5...20 мм. Нерасплавившуюся формовочную смесь удаляют встряхиванием (рис. 2.16, *в*), а модельную плиту с моделью загружают в печь и выдерживают при 300...400 °С 1...3 мин (рис. 2.16, *г*). При этом смола полимеризуется и переходит в твердое необратимое состояние. Затем оболочку снимают с модельной плиты при помощи штифтов (рис. 2.16, *д*). Подобным образом готовят и вторую полуформу. Две полуформы соединяют и склеивают по плоскости разъема (рис. 2.16, *е*). Готовую оболочку помещают в стальной ящик, засыпают пространство вокруг нее чугушной дробью или песком и заливают жидким металлом. После охлаждения отливки оболочка легко разрушается.

По сравнению с литьем в обычные песчаные формы этим методом получают отливки с более точными размерами, лучшей чистотой поверхности; затрачивают меньше труда и формовочных материалов.

Недостатками способа являются одноразовое использование формы, относительно высокая стоимость формовочной смеси и оборудования, выделение вредных газов при нагревании оболочек и заливке металла.

Глава IV. КОНТРОЛЬ ПРОИЗВОДСТВА ОТЛИВОК И ИХ ДЕФЕКТЫ

Контроль производства отливок включает проверку качества исходных материалов (металлических и неметаллических), технологических процессов литья и готовых отливок.

Контроль осуществляют на специально оборудованных участках, обеспеченных необходимыми контрольно-измерительными инструментами, приборами, приспособлениями.

Методы контроля производства отливок следующие: определение химического состава, механических и других свойств исходных материалов и отливок в лабораторных условиях;

внешний осмотр отливок, позволяющий выявить наружные дефекты;

выявление внутренних дефектов методами радиографической и ультразвуковой дефектоскопии;

проверка размеров отливок измерительными инструментами.

Наиболее распространены следующие дефекты отливок.

Коробление — искажение конфигурации и размеров отливки под действием напряжений, вызванных неравномерной усадкой или тепловой обработкой отливки.

Пригар — шероховатая поверхность отливки, получающаяся в результате проникновения жидкого металла в стенки формы или при сплавлении формовочных материалов с металлом.

Отбел чугуновых отливок — присутствие в различных частях отливки твердых, не поддающихся механической обработке мест со светлой поверхностью излома.

Горячие трещины — разрывы или надрывы в теле отливки с окисленными поверхностями, образовавшиеся при ее затвердевании в форме.

Холодные трещины — разрывы или надрывы в теле отливки с чистыми поверхностями. Образуются, когда

затруднена усадка отливки, при преждевременной ее выбивке из формы, а также от сильных ударов.

Раковины — газовые, усадочные, земляные.

Рыхлота и пористость — местное скопление мелких усадочных раковин. Причины образования те же, что и в случае усадочных раковин.

Спаи — сквозные или чаще поверхностные щели с закругленными краями или углубления в теле отливки, образованные неслившимися частями металла. Этот дефект возникает при низкой температуре заливки и очень медленном заполнении полости формы металлом.

Механические повреждения отливок — вмятины и заборны, образовавшиеся при транспортировке, выбивке и очистке литья.

Несоответствие металла отливки стандартам и техническим условиям по химическому составу.

Несоответствие размерам чертежа отливки.

Глава I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Обработка металлов давлением — высокопроизводительный процесс, позволяющий получать изделия с весьма точными размерами, с хорошей чистотой поверхности, с малыми отходами металла и с более высокими механическими свойствами по сравнению с отливками.

§ 1. Теоретические основы обработки металлов давлением

Процесс пластической деформации служит основой обработки материалов давлением, а способность их пластически деформироваться имеет большое значение как при изготовлении, так и при эксплуатации деталей и изделий. Деформацией называют изменение размеров и формы тела под действием приложенных сил. Различают упругую (исчезающая) и пластическую (остаточная) деформации.

Деформация протекает или под действием внешних сил, приложенных к телу, или под влиянием происходящих в самом теле физико-механических процессов (внутрифазовый наклеп).

Упругой называют деформацию, влияние которой на форму, структуру и свойства тела полностью исчезает после прекращения действия внешних сил. Упругая деформация не вызывает заметных остаточных изменений в структуре и свойствах металлов.

Под действием приложенных сил происходит незначительное, полностью обратимое смещение атомов, при котором нарушается баланс сил электростатического притяжения и отталкивания. После снятия нагрузки силы притяжения и отталкивания возвращают смещенные атомы в исходное равновесное состояние и кристаллы приобретают первоначальную форму и размеры.

Пластической называют деформацию, которая при достижении касательными напряжениями предела (по-

рог упругости) становится необратимой. При снятии нагрузки исчезает лишь упругая составляющая деформации, а пластическая остается. Схема упругой и пластической деформации металла, подвергнутого действию напряжений сдвига, показана на рисунке 3.1.

Пластическая деформация в кристаллах происходит в виде скольжения (двойникование). Скольжение — сме-

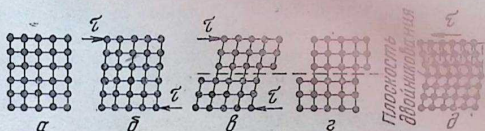


Рис. 3.1. Схема упругой и пластической деформации кристалла металла с кубической структурой под действием напряжений сдвига τ :

α — до деформации; β — после упругой деформации, вызванных скольжением при нагружении, большем предела упругости; γ — при напряжении, когда появляется сдвиг (после сдвига сохранилась остаточная деформация); δ — образование двойника.

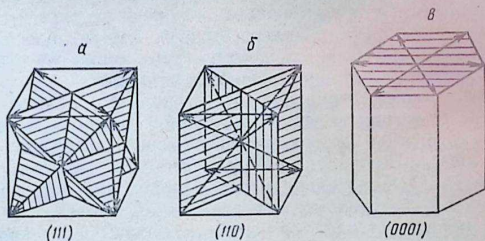


Рис. 3.2. Кристаллографические плоскости скольжения в гранцентрированной (α), объемноцентрированной (β) и гексагональной (γ) решетках.

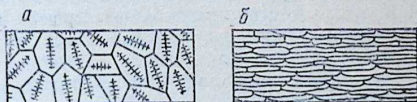


Рис. 3.3. Микроструктуры литой (α) и деформированной (β) сталей.

щение одной части относительно другой под влиянием касательных критических напряжений τ_k , действующих в плоскости и направлении скольжения. Скольжение происходит по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям с наибольшей атомной плотностью (рис. 3.2). Чем больше в металле возможных плоскостей и направлений скольжения, тем выше его способность к пластической деформации. Металлы, имеющие кубическую решетку, обладают высокой пластичностью, так как скольжение в них происходит во многих направлениях. Металлы с гексагональной плотноупакованной структурой менее пластичны, поэтому они труднее, чем металлы с кубической структурой, поддаются прокатке, штамповке и другим видам деформации.

Применяемые в промышленности металлы и сплавы имеют поликристаллическое строение. Они состоят из большого числа прочно сросшихся кристаллов неправильной формы, называемых кристаллитами (зерна).

При обработке заготовок давлением происходит пластическая деформация отдельных зерен металла и их относительное смещение. Деформация сопровождается раздроблением и удлинением зерен, в результате чего металл приобретает мелкозернистую строчечную структуру (рис. 3.3). Измельченные зерна ориентируются и вытягиваются по направлению деформации.

Выше рассматривалась деформация отдельных зерен. Рассмотрим теперь деформацию кусков металла. Под действием инструмента, производящего давление, превышающее предел упругости, металл деформируется (течет). Применительно к свободной ковке эта деформация может быть схематически представлена следующим образом. Падающая часть молота (бойком) давит на заготовку с силой P (рис. 3.4) и вызывает противодействие равной силы со стороны опоры (наковальня). Частицы заготовки, соприкасающиеся с бойком и наковальней, воспринимают это давление. Между бойком, наковальней и этими частицами возникает трение, задерживающее горизонтальное перемещение частиц. Частицы второго ряда заклиниваются между частицами первого ряда, что также задерживает их горизонтальное перемещение. Частицы третьего ряда заклиниваются между частицами второго ряда и т. д. В каждом последующем ряду количество заклинивающихся частиц уменьшается. В вертикальном сечении заготовки заклинивающиеся

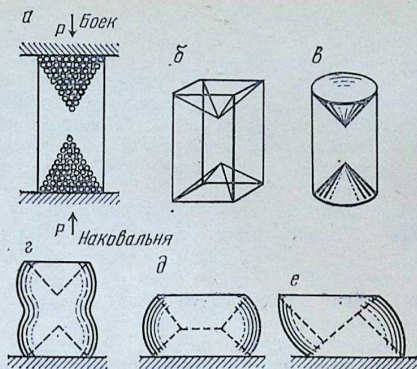


Рис. 3.4. Конусы скольжения и характер деформации при ковке:
 а — схема образования конуса скольжения; б — для квадратной заготовки (пирамида); в — для круглой заготовки (конус); г — образование конусов при незначительной степени деформации; д — внедрение конусов один в другой; е — скольжение одного конуса по другому.

частицы образуют треугольники. При ковке заготовок квадратного сечения частицы образуют пирамиды (рис. 3.4, б), а при ковке заготовок цилиндрической формы — конусы (рис. 3.4, в). В общем случае фигуры, образуемые при ковке заклинивающимися частицами, называют конусами скольжения.

Частицы, находящиеся в пределах конуса скольжения, не могут выйти из него, поэтому пластическая деформация металла происходит за счет частиц, расположенных вне конуса. Действие конусов скольжения подобно действию клиньев, внедряющихся в массу металла и тем самым деформирующих его, поэтому металл течет из тех слоев, где в данный момент действуют конусы скольжения. На рис. 3.4, г, д, е приведены различные стадии обжатия цилиндрической заготовки.

§ 2. Влияние некоторых факторов на процесс обработки давлением

Природная пластичность у различных металлов неодинакова, поэтому и ведут они себя по-разному при обработке давлением. Пластичность зависит от

многих факторов, основные — химический состав, структура, температура нагрева, скорость и степень деформации, схема напряженного состояния и схема деформации. Чистые металлы имеют более высокую пластичность, чем их сплавы. Это обусловлено образованием новых структурных составляющих. Например, пластичность стали существенно зависит от содержания углерода. Чем выше его содержание, тем ниже пластичность.

У литого металла пластичность ниже, чем у деформированного. Это объясняется тем, что у литого металла структура крупнозернистая, а у деформированного — мелкозернистая.

С повышением температуры пластичность металла растет, а сопротивление деформации падает.

Увеличение скорости деформации до определенного предела ведет к снижению пластичности, но в дальнейшем пластичность возрастает.

Степень деформации металла определяет возможность осуществления процесса деформации (особенно при холодной обработке давлением). При превышении определенного предела степени деформации для каждого конкретного случая нарушается целостность металла (появляются трещины, надрывы и другие дефекты).

Напряженное состояние деформируемого тела характеризуется схемой главных (нормальные) напряжений, действующих по граням элементарного куба в трех взаимно перпендикулярных направлениях. В зависимости от способа приложения внешних сил к деформируемому телу напряженное состояние его может быть различным. Существуют девять схем главных напряжений: четыре объемных, три плоских и две линейных. При различных процессах обработки давлением напряженное состояние металла характеризуется обычно двумя объемными схемами (рис. 3.5, а): по трем главным осям действуют напряжения сжатия; по двум осям действуют напряжения сжатия, а по третьей — напряжение растяжения. При первой схеме напряженного состояния металл более пластичен, чем при второй, так как растягивающие напряжения снижают пластичность.

Деформированное состояние характеризуется тремя схемами деформации (рис. 3.5, б): по одной оси металл сжимается, по двум другим растягивается; по одной оси

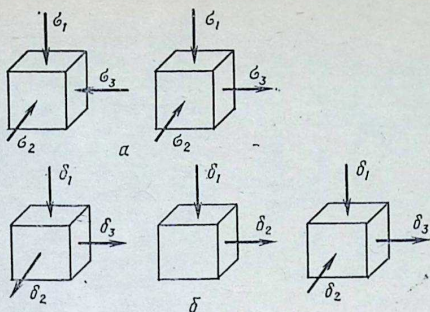


Рис. 3.5. Схемы главных напряжений (а) и главных деформаций (б).

металл сжимается, по второй растягивается, по третьей деформация отсутствует; по двум осям металл сжимается, по третьей растягивается.

Чем меньшую роль в схеме деформации играет растяжение, тем большую способность к пластической деформации проявляет металл. Один и тот же металл может иметь хорошую пластичность при третьей схеме деформации и плохую при первой.

Чтобы правильно выбрать режим обработки металла давлением, необходимо знать совместное влияние перечисленных выше факторов на его пластичность. Для этого разработаны диаграммы зависимости пластичности металлов от температуры, скорости и схемы деформации. По таким диаграммам можно выбрать условия деформации, обеспечивающие максимальную пластичность металла.

§ 3. Нагрев металла и нагревательные устройства

Заготовки перед обработкой давлением нагревают для повышения пластичности металла, в результате чего его сопротивление деформации уменьшается в 10...15 раз по сравнению с холодным состоянием.

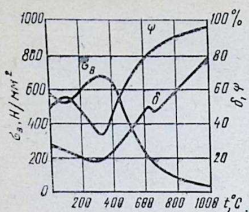


Рис. 3.6. Кривые изменения механических свойств отожженной стали при нагреве.

На рисунке 3.6 приведены кривые изменения механических свойств отожженной стали в зависимости от температуры нагрева, которые показывают, что при нагреве до 300 °С прочность (σ_B) возрастает, а пластичность (δ и ψ) уменьшается. При дальнейшем нагреве прочность резко уменьшается, а пластичность возрастает. Чем больше нагрета сталь, тем меньше энергии затрачивают на ее деформацию. Однако нельзя допускать пережога, который наблюдают при нагреве, близком к температурам солидуса.

Температурные интервалы обработки давлением зависят главным образом от химического состава сплавов. Начальную температуру обработки определяют по формуле:

$$t_n = at_{пл},$$

где a — коэффициент повышения температуры (0,85...0,95); $t_{пл}$ — температура плавления сплава из диаграммы состояния, °С.

Конечную температуру обработки давлением углеродистых сталей, зависящую от содержания углерода, определяют по формуле:

$$t_k \approx 0,7t_{пл}.$$

Температурный интервал деформации углеродистых сталей определяют по диаграмме состояния сплавов железо — углерод (рис. 3.7).

Чтобы подсчитать время, необходимое для нагрева заготовок, используют эмпирические формулы, разработанные Н. Н. Доброхотовым. Формула для определения времени нагрева стали до 1200 °С имеет следующий вид:

$$T = \alpha K D \sqrt{D},$$

где T — минимальное время нагрева заготовки, ч; α — коэффициент, учитывающий способ укладки заготовок на поду печи; K — коэффициент, учитывающий легирование стали; D — диаметр (или сторона квадрата) заготовки, м.

Металлические заготовки для горячей обработки давлением нагревают в горнах и печах. **Кузнечные горны** (стационарные и переносные) применяют для нагрева небольших кусков металла и преимущественно при штучном производстве и в ремонтных мастерских сельскохозяйственных предприятий.

В серийном производстве для нагрева заготовок применяют пламенные и электрические печи. **Пламенные печи** работают на твердом, жидком и газообразном топливе. В них нагревают как мелкие, так и крупные заготовки. По характеру распределения температуры в рабочем пространстве печи делят на камерные (температура во всем рабочем пространстве одинакова) и методические (температура в рабочем пространстве повышается от загрузочного окна к окну выдачи нагретых заготовок). В пламенных печах заготовки соприкасаются с продуктами горения, поэтому металл угорает. Для исключения или уменьшения образования окалины применяют безокислительный нагрев металла в расплавленных солях, в среде защитных газов, в муфельных печах, защищают поверхность заготовки специальными покрытиями из стекла, окиси лития.

Электрические печи сопротивления имеют металлические или карборундовые элементы сопротивления, которые подключают к электрической сети. Печи чаще применяют для нагревания цветных металлов и сплавов, имеющих невысокую температуру начала обработки давлением. В таких печах температуру можно регулировать.

Кроме электрических печей сопротивления существуют **контактные и индукционные электронагревательные устройства**. В устройствах электроконтактного нагрева заготовку зажимают между медными контактами, к которым подведен ток большой силы. В устройст-

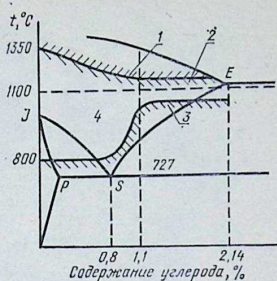


Рис. 3.7. Температурные интервалы горячей обработки давлением стальных заготовок: 1 — зона пережога; 2 — зона перегрева; 3 — зона наклепа; 4 — зона горячей обработки давлением.

вах индукционного нагрева заготовку помещают в индуктор, по которому пропускают ток высокой частоты. Применение электричества обеспечивает высокую скорость нагрева, удобство регулирования температуры, минимальное окисление металла, автоматизацию процесса.

При обработке металлов давлением очень важно соблюдать определенную температуру нагрева, которую контролируют приборами, называемыми пирометрами.

Глава II. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ

§ 1. Прокатка

Прокатка — обжатие металла вращающимися валками прокатного стана. Применяют три основных вида прокатки: продольную, поперечную и косую. При **продольной прокатке** (рис. 3.8, а) металл 2 обжимается между двумя валками 1, вращающимися в разные стороны, и перемещается перпендикулярно осям валков. Этот вид прокатки имеет наибольшее применение; его используют для изготовления профильного и листового проката.

При **поперечной прокатке** (рис. 3.8, б) валки 1, вращаясь в одном направлении, передают вращение заготовке 2, которая, перемещаясь вдоль оси валков, деформируется. Поперечную прокатку применяют для получения специальных и периодических профилей.

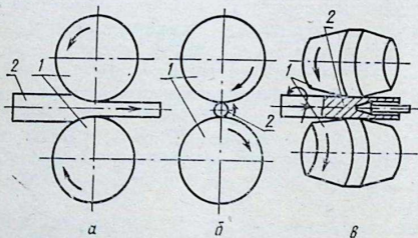


Рис. 3.8. Основные виды прокатки:

а — продольная; б — поперечная; в — косая; 1 — валки прокатных станов; 2 — заготовки.

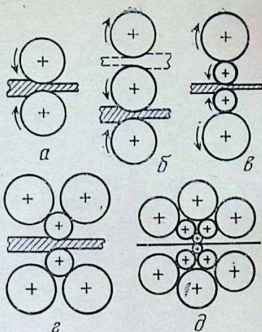
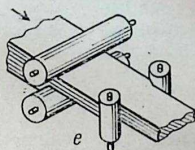


Рис. 3.9. Расположение валков в рабочих клетях прокатных станов

а — двухвалковые; *б* — трехвалковые; *в* — четырехвалковые; *г* и *д* — многовалковые; *е* — универсальные.



При косо́й прокатке (рис. 3.8, в) валки 1, расположенные под некоторым углом один к другому, сообщают заготовке 2 вращательное и поступательное движение. Эту прокатку применяют для получения пустотелых заготовок при производстве труб.

Оборудование, на котором прокатывают металл, называют прокатным станом. По количеству валков и их расположению станы делят на двух-, трех-, четырех-, многовалковые и универсальные. *Двухвалковые станы* (рис. 3.9, а) бывают реверсивные (заготовки прокатывают в обе стороны) и неревверсивные (прокатка идет в одну сторону, а для повторных пропусков заготовку возвращают через верхний валок). *В трехвалковых станах* (рис. 3.9, б) за счет наличия в каждой рабочей клетки трех валков изменяют направление прокатки. *Четырехвалковые станы* (рис. 3.9, в) имеют два рабочих (меньшего диаметра) и два опорных валка (большого диаметра), служащих для уменьшения прогиба рабочих валков. Это при производстве широких листов увеличивает точность их размеров по толщине. У *многовалковых станов* (рис. 3.9, г и д) очень большая жесткость рабочих валков. Станы применяют для прокатки очень тонких полос с малыми припусками по толщине. *Универсальные станы* (рис. 3.9, е) имеют вертикальные валки, расположенные с одной или с обеих сторон от горизонтальных валков. На них металл обжимают при каждом пропуске со всех сторон. Эти станы применяют

для прокатки широких листов и широкополосных двутавровых балок.

По назначению прокатные станы делят на обжимные, заготовочные, сортовые, листовые и специальные. Вначале слиток или прессованную заготовку прокатывают на обжимном стане, затем на заготовочном и, наконец, на сортовом, листовом или специальном. К обжимным станам относят блюминги и слябинги. *Блюминги* — мощные реверсивные двухвалковые станы с диаметром валков 800...1500 мм, прокатывающие слитки массой 2...35 т в заготовки крупных размеров (блюмы). *Слябинги* — мощные универсальные реверсивные станы с диаметром горизонтальных валков 1100...1200 мм, вертикальных — 700 мм. Используют для прокатки листовых заготовок (слябы) толщиной 75...300 мм и шириной 400...1600 мм.

Заготовочные станы имеют валки диаметром 450...850 мм. На этих станах прокатывают блюмы и заготовки меньших размеров (60×60...150×150 мм). Наиболее совершенны непрерывные заготовочные станы, устанавливаемые непосредственно за блюмингами.

Сортовые станы в зависимости от размеров сортовой стали и назначения изделий разделяют на рельсобалочные с валками диаметром 750...900 мм для прокатки железнодорожных рельсов, балок, швеллеров и других крупных профилей; крупносортные с валками диамет-

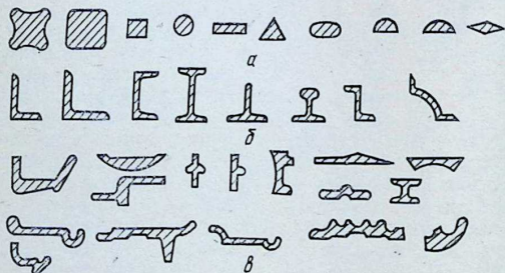


Рис. 3.10. Сортамент проката:

a — простой профиль; *b* — фасонный общего назначения; *c* — специального назначения.

ром 500...750 мм; среднесортные с валками диаметром 350...450 мм; мелкосортные с валками диаметром 250...325 мм.

Прокатные станы бывают с одной рабочей клетью (блюминги) и с несколькими рабочими клетями (сортовые станы). Клетки могут располагаться в линию или последовательно одна за другой. При последовательном расположении у клеток самостоятельные приводы, а у валков свои частоты вращения. Станы с последовательным расположением клеток называют *непрерывными*, так как заготовка идет из одной клетки в другую без поворотов и возвратов. Станы, сочетающие последовательное и линейное расположение клеток, называют *полунепрерывными*.

Форму поперечного сечения изделия, прокатанного на сортовом стане, называют профилем, а совокупность одинаковых профилей разных размеров — сортаментом (рис. 3.10).

§ 2. Волочение

Волочение — процесс обработки металлов давлением с протаскиванием заготовки 1 через отверстие матрицы 2, сечение которого меньше исходного сечения заготовки (рис. 3.11). В результате волочения получают изделие с постоянным сечением по всей длине. При волочении за счет уменьшения поперечного сечения заготовки увеличивается ее длина. Степень деформации металла характеризуют коэффициентом обжатия ψ , %:

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} 100,$$

где F_0 и F_1 — площадь поперечного сечения заготовки соответственно до волочения и после.

Для того чтобы при волочении металл не разрушался, коэффициент утонения K должен быть 0,8...0,95:

$$K = d/D,$$

где d и D — диаметр заготовки соответственно после волочения и до него.

Волочение проходит без нагрева металла, поэтому создается наклеп, который устраняют отжигом. Этот

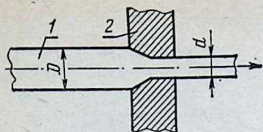


Рис. 3.11. Схема волочения:
1 — заготовка; 2 — матрица (фильера).

способ обработки давлением применяют преимущественно для получения проволоки малого диаметра (0,01...4 мм), калиброванных прутков различного профиля и тонких труб из катаных и прессованных заготовок.

Волочение производят на станах с прямолинейным движением тянущих устройств и с круговым движением протягиваемого металла (барабанные).

Волочительный стан состоит из двух основных частей: матрицы (волока) и тянущего устройства. Через волоки (фильеры) тянущее устройство протягивает заготовку. Волоки изготовляют из инструментальных сталей У8, У9, У10, У11, У12, из сталей ШХ15, Х12М, из твердых сплавов ВК2, ВК3, ВК6, ВК8, ВК10, ВК15, из алмаза (для получения проволоки диаметром менее 0,3 мм).

Процесс волочения проволоки и тонкостенных труб состоит из следующих операций. Подготовка заготовки (катанка) к волочению включает удаление окалины травлением в водных растворах кислот, промывку и сушку. Затем на поверхность наносят смазку (минеральное масло, мыло, графит и др.).

Режим волочения разрабатывают, исходя из суммарной вытяжки или суммарного обжатия, числа проходов, имеющегося оборудования, количества частных вытяжек или обжатий, размеров протягиваемой заготовки по проходам, скорости волочения.

§ 3. Прессование

Прессование — процесс обработки металлов давлением путем выдавливания его пуансоном из контейнера через отверстие в матрице. При этом металл принимает форму (круглую, квадратную и др.), соответствующую конфигурации отверстия в матрице. Чаще прессование применяют для получения изделий из цветных металлов и их сплавов. Существует прямое и обратное прессование.

Прямое прессование (рис. 3.12, а). Заготовку 1 за-

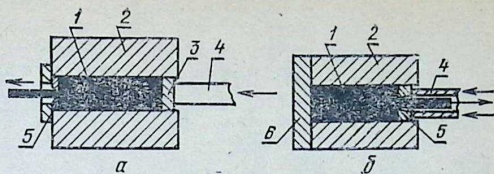


Рис. 3.12. Схема прямого (а) и обратного (б) прессования:

1 — заготовка; 2 — контейнер; 3 — пресс-шайба; 4 — пуансон; 5 — матрица; 6 — упорная шайба.

кладывают в контейнер 2, закрывают пресс-шайбой 3 и пуансоном 4 выдавливают через матрицу 5. Направление течения металла совпадает с направлением движения пуансона. К концу операции в контейнере остается небольшая часть металла (18...20% массы заготовки), называемая пресс-остатком.

Обратное прессование (рис. 3.12, б). Контейнер 2 закрыт с одного конца упорной шайбой 6, давление на заготовку 1 передается через полый пуансон 4 с укрепленной на нем матрицей 5. Металл выдавливается навстречу движению пуансона. При этом методе пресс-остаток составляет 5...6% массы заготовки.

Прессованием можно изготовить прутки диаметром 5...300 мм, трубы с внутренним диаметром 18...350 мм и толщиной стенки 1,25...5 мм, различные профили. Эти изделия превосходят по точности, разнообразию и сложности изделия, получаемые прокаткой.

В последнее время применяют гидравлическое прессование, позволяющее обрабатывать очень хрупкие сплавы. В данном случае металл находится в состоянии всестороннего сжатия, потери на трение минимальные.

§ 4. Свободная ковка

Свободная ковка — процесс, при котором металл течет свободно (не ограничен поверхностями штампа), не встречая сопротивления своему движению. Ковку осуществляют последовательными ударами кувалды, бойка молота или нажимами бойка пресса. Металл, подвергаемый ковке, как правило, нагревают.

Инструмент для свободнойковки делят на три группы: для обработки, удержания и измерения поковок (рис. 3.13). К инструменту для обработки поковок относят кувалды, молотки (ручники), гладилки, прошивни, зубила, обжимки и др. Удерживающий инструмент — наковальни и различные клещи. Для измерения поковок используют линейки, угольники, кронциркули, шаблоны и др.

Основные операции свободнойковки — осадка, высадка, протяжка, разгонка, рубка, прошивка, раскройка, передача металла, гибка.

При *осадке* (рис. 3.14, а) поперечное сечение заготовки увеличивают за счет уменьшения ее высоты. Во избежание продольного изгиба высота осаживаемой заготовки не должна превышать ее диаметр или толщину более чем в 2,5 раза. Вследствие действия сил трения T по контактным поверхностям боковая поверхность заготовки приобретает бочкообразную форму.

Высадку (осаживание части заготовки) осуществляют при нагревании соответствующей части заготовки (конец или середина) или ограничивая деформацию заготовки на некоторой ее части кольцевым инструментом K (рис. 3.14, б).

При *протяжке* (рис. 3.14, в) длину заготовки увеличивают за счет уменьшения ее поперечного сечения. Протяжку можно вести с края заготовки и с середины. Протяжку с поворотом заготовки вокруг оси на 90° называют протяжкой с кантовкой.

Разгонки металла по длине заготовки (рис. 3.14, г) достигают обработкой ее отдельных участков, при этом длинную ось бойка располагают параллельно оси заготовки.

Для разделения заготовки на несколько частей применяют *рубку* (рис. 3.14, д) соответствующим инструментом I (зубило, подсечка).

Сквозные или *глухие отверстия* в заготовке получают прошивкой (рис. 3.14, е), применяя специальный инструмент $П$ (прошивень). Прошитые заготовки можно подвергать раскатке по диаметру (рис. 3.14, ж) с использованием оправки O , что приводит к утоньшению стенки кольца и увеличению его диаметра (длинная ось бойка параллельна оси кольца); или протяжке вдоль оси (рис. 3.14, з), при которой длина кольца возрастает

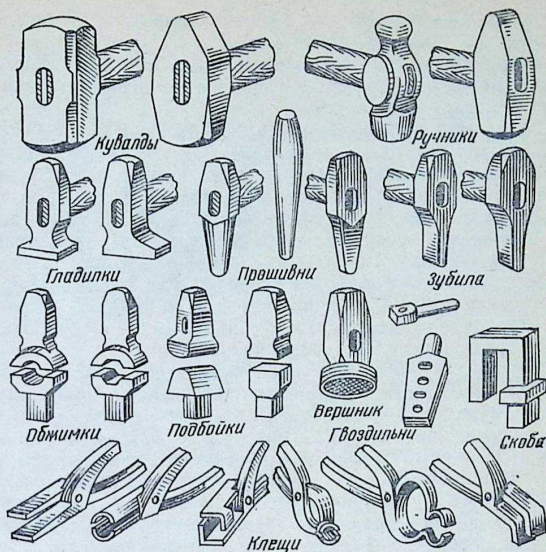


Рис. 3.13. Инструмент для свободнойковки.

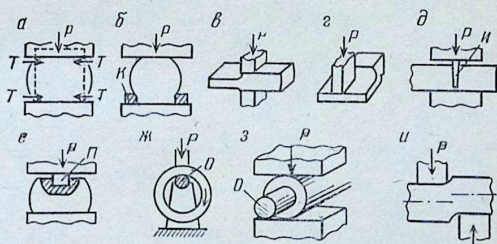


Рис. 3.14. Операции свободнойковки:

а — осадка; б — высадка; в — протяжка; г — разгонка; д — рубка; е — прошивка; ж — раскатка; з — протяжка вдоль оси; и — передача.

ет из-за утоньшения его стенок (длинная ось бойка перпендикулярна оси заготовки).

Передачу металла заготовки (рис. 3.14, и) с одного места на другое применяют при изготовлении коленчатых валов и других поковок.

Для получения поковок с изогнутой осью применяют *гибку*. При изготовлении поковки в каждом случае разрабатывают индивидуальную технологию. При этом составляют чертеж поковки на основании чертежа готовой детали с указанием припусков, допусков и напусков.

Припуск — предусмотренное превышение размеров поковки против номинальных размеров детали, обеспечивающее после обработки резанием указанные на чертеже размеры детали и чистоту поверхности.

Допуск — разность между наименьшим и наибольшим предельными размерами поковки.

Напуск — увеличение припуска, упрощающее конфигурацию поковки. Применяют, когда невозможно или нерентабельно делать поковку по контуру детали.

Ручную ковку ведут на наковальне, применяя кувалды и различный подкладной инструмент, а машинную — на ковочных молотах и прессах. Для изготовления мелких поковок применяют пневматические ковочные молоты, для средних поковок — паровоздушные. Крупные тяжелые поковки изготавливают на ковочных прессах.

В ремонтных мастерских сельскохозяйственных предприятий, колхозов и совхозов широко применяют ручную ковку и ковку на пневматических молотах. Ковочный молот имеет падающую часть (баба с прикрепленным к ней снизу верхним бойком) и неподвижную (шабот с закрепленным в нем нижним бойком). Обычно масса шабота примерно в 15 раз больше массы падающей части. Это необходимо для того, чтобы коэффициент полезного действия удара был 0,8...0,9.

Пневматический молот (рис. 3.15) имеет два параллельных цилиндра (рабочий 4 и компрессионный 5). В рабочем цилиндре движется поршень 3, связанный с бабой. Кривошипно-шатунный механизм 9 приводит в движение поршень 8, который, перемещаясь, поочередно сжимает воздух в нижней и верхней полостях компрессионного цилиндра и нагнетает его в полость рабочего цилиндра по каналам 6, в результате чего происходит опускание (удар) и подъем бабы. Для впуска и выпуска воздуха используют краны 7, управляемые пе-

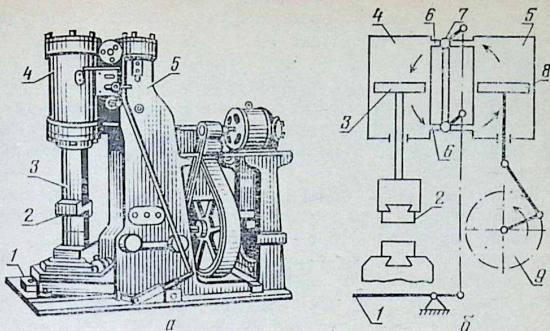


Рис. 3.15. Общий вид (а) и схема (б) пневматического молота:

1 — педаль; 2 — боек; 3 — поршень; 4 — рабочий цилиндр; 5 — компрессионный цилиндр; 6 — воздушные каналы; 7 — кран; 8 — поршень компрессора; 9 — кривошипно-шатунный механизм.

далью 1. Пневматические молоты совершают 95...210 ударов в минуту, могут делать отдельные удары автоматически, поддерживать бабу в поднятом состоянии или прижимать ее к заготовке. Масса падающих частей составляет от 50 кг до 1 т.

§ 5. Объемная штамповка

Объемную штамповку производят в штампах, состоящих обычно из двух половин, которые в собранном виде создают одну или несколько внутренних полостей, называемых ручьями. В отличие от свободнойковки, течение металла при деформации ограничено внутренними стенками штампа. Изделия, получаемые штамповкой, отличаются высокой точностью размеров, хорошим качеством поверхности и небольшими припусками и допусками.

Штампы изготовляют из сталей марок 5ХНВ, 5ХНМ, 5ХГМ, 3Х2В8Ф и др. Каждый штамп предназначен для получения поковок определенной конфигурации, размера и массы.

Открытыми штампами называют такие, у которых вокруг всего внешнего контура штамповочного ручья

есть специальная облойная канавка 4, соединенная тонкой щелью с полостью 3, образующей поковку (рис. 3.16, а). В процессе штамповки через щель в канавку вытесняется избыточная часть металла, образуя по контуру поковки облой. Это приводит к некоторому увеличению отходов металла, но зато упрощает процесс штамповки. Облой с поковки обрезают особыми штампами.

Закрытыми штампами называют такие, в которых металл деформируется в замкнутом пространстве 3 без образования облоя (рис. 3.16, б). Расход металла на изготовление поковки сокращается, а процесс получения годной поковки усложняется. Закрытые штампы более перспективны, но из-за сложности их применяют пока редко.

В штампах с одним ручьем изготавливают поковки простой формы, а поковки сложной конфигурации получают в многоручьевых штампах (рис. 3.17).

Горячей объемной штамповкой получают крупные поковки массой 450...500 кг, а холодной — более мелкие. При горячей объемной штамповке основным исходным материалом служит сортовой прокат из стали, цветных металлов и их сплавов. Технологический процесс горячей объемной штамповки в общем случае состоит из следующих операций: разделка проката на заготовки определенной массы и размеров; загрузка заготовок в печь и нагревание до определенной температуры (900...1200 °С для стали); укладка заготовки на нижнюю половину штампа и штамповка; удаление поковки из штампа; термическая обработка поковки; обрубка облоев и отделка.

Горячую объемную штамповку выполняют на штамповочных молотах, ковочно-штамповочных прессах, горизонтально-ковочных машинах и другом оборудовании. Получают разнообразные изделия: коленчатые валы, колеса, шатуны, рычаги, шестерни, болты, гайки, втулки и др. В связи со значительной стоимостью штампов штамповку рентабельно применять только в условиях крупносерийного и массового производства.

Холодную объемную штамповку подразделяют на плоскую и объемную калибровку, холодное выдавливание, холодную высадку и чеканку.

Плоскую калибровку применяют для получения точных размеров между отдельными плоскостями,

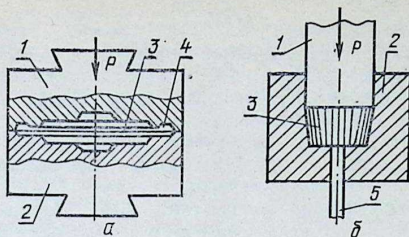


Рис. 3.16. Схемы открытого (а) и закрытого (б) штампов:

1 — верхняя часть штампа; 2 — нижняя часть штампа; 3 — полость штампа; 4 — облойная канавка; 5 — выталкиватель.

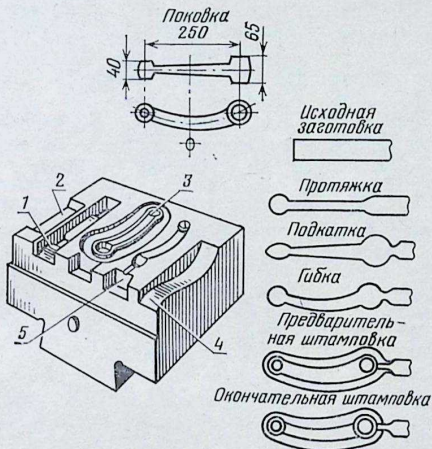


Рис. 3.17. Многоручевой штамп для изготовления рычага из прутка и технологические переходы:

1 — подкатной ручей; 2 — протяжной ручей (куда вначале поступает нагретая заготовка); 3 — предварительный (черновой) штамповочный ручей; 4 — гибочный ручей; 5 — окончательный (чистовой) штамповочный ручей.

а объемную — для отделки поверхности поковки при одновременном повышении точности всех ее размеров. Калибровку выполняют на шарнирно-рычажных чеканочных прессах. Холодное выдавливание (прямое и обратное) подобно прессованию. Применяют в основном при обработке цветных металлов и сплавов. Холодную высадку широко используют для получения мелких деталей в массовом производстве (гайки, болты, шурупы, заклепки, гвозди и т. п.). Чеканка — получение на поверхности готовой детали выпукло-вогнутого рельефа. Примером может служить чеканка монет, знаков, медалей и т. п.

§ 6. Листовая штамповка

Листовая штамповка — производство изделий из листового материала с использованием штампов. При листовой штамповке изменяют только взаимное положение отдельных частей исходной заготовки или отделяют какую-то часть от целого листа. Этим способом изготовляют разнообразные детали для автомобилей, тракторов, комбайнов и других сельскохозяйственных машин (крылья, капоты, бункеры, ящики, диски колес, детали радиаторов и др.). Листы толщиной более 10 мм подвергают горячей штамповке, менее 10 мм — холодной.

Основные технологические операции листовой штамповки подразделяют на разделительные и формоизменяющие. *Разделительные операции:* вырезка — отделе-

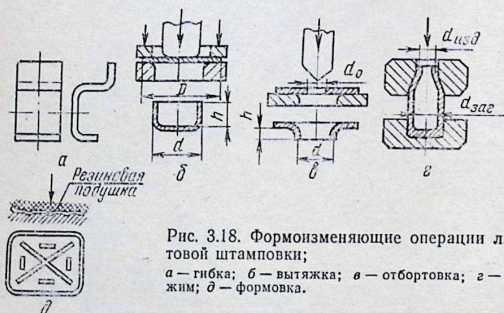


Рис. 3.18. Формоизменяющие операции листовой штамповки;

а — гибка; б — вытяжка; в — отбортовка; г — обжим; д — формовка.

ние от заготовки части металла определенного контура; отрезка — полное отделение детали от листа; проколка — получение сквозного отверстия; пробивка — получение в заготовке сквозных отверстий различной формы с полным отделением металла (отход).

Формоизменяющие операции (рис. 3.18): гибка — придание заготовке изогнутой формы по заданному контуру; вытяжка — получение из плоской заготовки диаметром D изделия заданной формы с размерами d и h ; отбортовка — образование борта заданной формы (диаметр d , высота h) путем расширения ранее пробитого отверстия; обжим — уменьшение диаметра части заготовки $d_{\text{заг}}$ до диаметра изделия $d_{\text{изд}}$; формовка — изменение формы заготовки местной деформацией растяжения (изготовление ребер жесткости).

Штампы для листовой штамповки бывают *простые* (однооперационные) и *сложные* (многооперационные).

Листовую штамповку осуществляют на прессах. Наибольшее применение получили кривошипно-шатунные и фрикционно-винтовые прессы. В настоящее время в производство внедряют новые методы: штамповка эластичной (резина) и жидкой средой, взрывом и электрогидравлическая.

Штамповку взрывом применяют для изготовления крупных изделий сложной конфигурации (рис. 3.19). В контейнер 1 с водой устанавливают матрицу 2 с листовой заготовкой 3, прижатой к ней кольцом 4 с уплотнителем. В полости матрицы создают вакуум. Взрывчатое вещество 5 подвешивают в воде над заготовкой. Взрыв создает высокое давление, под действием которого заготовка принимает форму матрицы.

При электрогидравлической штамповке энергоносителем служит высоковольтный электрический разряд в жидкости. Разряд вызывает ударную волну, которая деформирует заготовку.

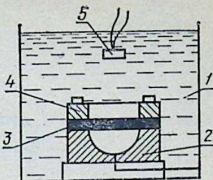


Рис. 3.19. Схема штамповки взрывом:

1 — контейнер с водой; 2 — матрица; 3 — заготовка; 4 — прижимное кольцо; 5 — взрывчатое вещество.

Раздел СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

четвертый

Глава I. КЛАССИФИКАЦИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБОВ СВАРКИ

§ 1. Физическая сущность процессов, протекающих при сварке

Сварка — это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном нагреве или пластическом деформировании, а также при совместном действии того и другого.

Сущность сварки заключена в следующем. Поверхностные атомы куска металла имеют свободные, ненасыщенные связи, которые способны захватывать всякий атом или молекулу, оказавшуюся в зоне действия межатомных сил. Если сблизить поверхности двух кусков металла на расстояние действия межатомных сил, то по поверхности соприкосновения произойдет сращивание их в одно целое с прочностью соединения, равной прочности цельного металла. Но при нормальной температуре металлы нельзя соединить не только при простом контакте, но и при приложении значительных усилий.

Главный фактор, мешающий соединению, — твердость металлов. У большинства металлов твердость достаточно велика и получить поверхность действительного соприкосновения очень затруднительно, даже при тщательной обработке и пригонке.

Кроме того, практическое получение монолитных соединений осложнено тем, что свариваемые поверхности имеют микронеровности, поэтому контактирование при совмещении возможно лишь в отдельных случаях; свариваемые поверхности загрязнены окислами, жировыми пленками, так как на любой поверхности твердого тела адсорбируются атомы внешней среды (рис. 4.1).

При нагреве металл становится пластичным, затем расплавляется, что позволяет ему сливаться в общую

сварочную ванну. Давление, прилагаемое к соединяемым частям, создает значительную пластическую деформацию, и металл начинает течь подобно жидкости. При сварке металл должен перемещаться вдоль поверхности раздела, унося с собой поверхностный слой с загрязнениями и пленками адсорбированных газов.

Соединение атомов при сварке металлов происходит обычно в очень тонком слое (в несколько атомных диаметров). Зону сварки, имеющую пленочный характер, можно увеличить за

счет таких процессов, как диффузия, растворение, кристаллизация, протекающих медленно и постепенно распространяющихся по объему металла.

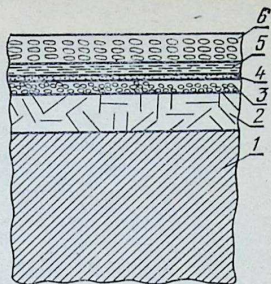


Рис. 4.1. Адсорбированные слои на поверхности металла: 1 — металл; 2 — деформированная зона; 3 — слой оксидов; 4 — адсорбированный слой газов; 5 — адсорбированный слой воды; 6 — слой полярных молекул.

§ 2. Классификация способов сварки

Сварка — ведущий технологический процесс при изготовлении и ремонте металлических конструкций и изделий в промышленности, строительстве, транспорте, сельском хозяйстве.

Способы сварки разделяют по виду энергии, применяемой для получения сварного соединения, на механические, химические, электрические, электромеханические, химико-механические, лучевые и др. Например, к механическим способам относят сварку трением, холодную, ультразвуковую и др.; к химическим — газовую и термитную; к электрическим — дуговую, электрошлаковую, плазменно-дуговую и др.

Способы сварки можно разделить на ручные, механизированные, полуавтоматические, автоматические.

В зависимости от метода получения сварного соединения различают сварку плавлением и давлением. При сварке плавлением (газовая, термитная, электрошлаковая, электроннолучевая, лазерная) специальный источ-

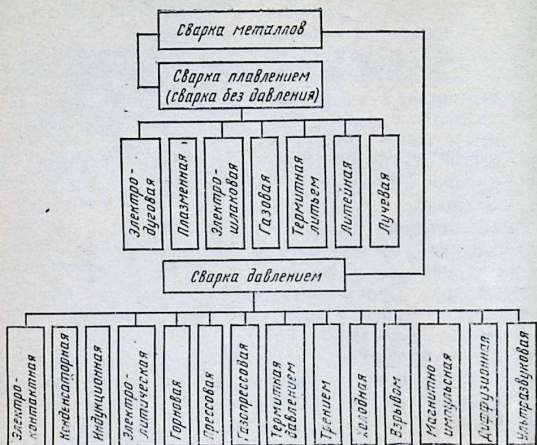


Рис. 4.2. Классификация способов сварки по методу получения сварного соединения.

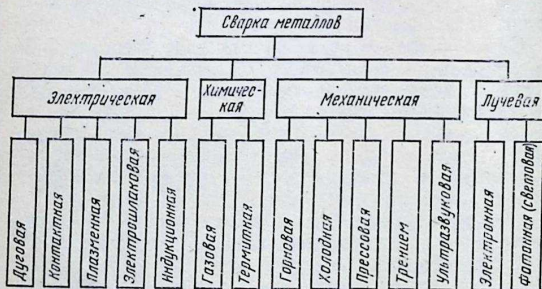


Рис. 4.3. Энергетическая классификация способов сварки.

ник тепла нагревает и расплавляет кромки соединяемых деталей на небольшом участке. При сварке давлением (контактная, газопрессовая, диффузионная, холодная, трением, ультразвуковая, взрывом), для того чтобы произошло схватывание кромок, их сдавливают. Иногда, чтобы облегчить схватывание, место сварки нагревают до пластического состояния металла или даже до расплавления.

Большинству способов сварки название дано по виду энергии и физическим явлениям, благодаря которым происходит межатомная связь в месте соединения (рис. 4.2, 4.3). Каждый способ имеет определенные технологические возможности и применяется при изготовлении конкретных изделий с учетом требований производства.

§ 3. Виды сварных соединений и швов

При изготовлении сварных конструкций применяют сварные соединения (стыковые, внахлестку, тавровые, угловые и заклепочные).

Стыковые соединения различают по виду предварительной подготовки кромок в зависимости от толщины свариваемого металла (рис. 4.4, а). При толщине металла до 3 мм применяют отбортовку без зазора, а при толщине листов 3...8 мм сваривают без подготовки кромок при зазоре 2 мм. Листы толщиной до 15 мм сваривают с односторонней V-образной разделкой кромок. При толщине листа больше 15 мм рекомендуют двухстороннюю X-образную разделку кромок. Листы толщиной более 20 мм сваривают с чашеобразной разделкой кромок, которая может быть односторонней и двухсторонней.

Нахлесточные соединения (рис. 4.4, б) характеризуются перекрытием кромок свариваемых листов. Перекрытие должно быть в 3...5 раз больше толщины свариваемых элементов. Разновидности нахлесточных соединений — прорезные и электрозаклепочные соединения.

Тавровые соединения выполняют приваркой одного элемента изделия перпендикулярно к другому (рис. 4.4, в). Без скоса кромок сваривают конструкции с малой нагрузкой. При изготовлении ответственных конструкций с элементами толщиной 10...20 мм применяют односторонний скос, а при толщине элементов более 20 мм — двухсторонний.

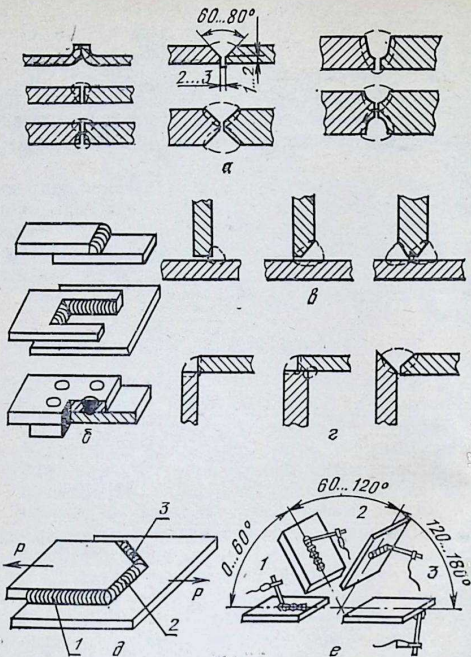


Рис. 4.4. Сварные соединения:

a — соединения и швы встык; *б* — соединения внахлестку; *в* — тавровые соединения; *г* — угловые соединения; *д* — типы швов по направлению действующих на них усилий (1 — фланговые; 2 — лобовые; 3 — косые); *е* — типы швов по положению в пространстве (1 — нижние; 2 — вертикальные; 3 — потолочные).

Угловые соединения при любой толщине свариваемых элементов можно получить без подготовки кромок (рис. 4.4, *г*). Кромки подготавливают редко.

В зависимости от расположения швов к направлению действующего на них усилия различают швы *фланговые* 1, *лобовые* 2 и *косые* 3 (рис. 4.4, *д*).

По расположению швов в пространстве, которое они занимают во время сварки, различают *нижние* 1, *верти-*

кальные 2 и потолочные 3 (рис. 4.4, е). Швы, накладываемые горизонтально при вертикальном положении изделия, называются *горизонтальными*.

Швы можно выполнять *непрерывными* и *прерывистыми* в зависимости от действующей нагрузки.

§ 4. Строение сварного шва

Металл шва имеет характерное дендритное строение, размеры, форма, степень химической однородности и направленность которого определяются условиями сварки и свойствами свариваемого материала. Свойства сварного соединения в целом определяются характером теплового воздействия на металл в околошовной зоне (зона термического влияния), размеры которой зависят от способа сварки, химического состава и толщины свариваемого изделия.

При сварке низкоуглеродистой стали наплавленный металл 1 имеет столбчатое строение, характерное для литой стали при ее медленном охлаждении, и называется сварным швом (рис. 4.5). Он образуется при кристаллизации основного и присадочного металлов. Доля

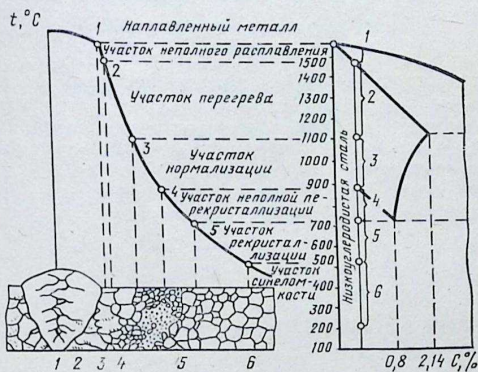


Рис. 4.5. Схема строения стыкового сварного соединения.

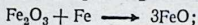
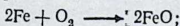
основного металла составляет 30...70% и зависит от метода и технологии сварки. На границе между основным и наплавленным металлами расположена *зона сплавления*. На этом участке металлы срастаются, проникая один в другой, что обеспечивает прочность сварного соединения. Ширина зоны сплавления 0,1...0,4 мм. Участок 2 называют *зоной перегрева*. Здесь происходит рост аустенитного зерна. Участок 3 — *зона перекристаллизации*. Здесь температура снижается до 900...1100 °С и происходит нормализация, в результате которой образуется мелкое зерно. Участок 4 — *зона неполной перекристаллизации*. Здесь при температуре 720...900 °С происходит лишь частичное изменение структуры. Температура *зоны рекристаллизации* 5 достигает лишь 500...700 °С. Здесь происходят процессы, подобные разупрочнению металла. *Зона синеломкости* 6 нагревается до 500 °С и не претерпевает структурных превращений.

При сварке сталей, склонных к закалке, структура зоны термического влияния будет несколько иной. В этом случае за зоной сварного шва будут располагаться участки закалки и неполной закалки.

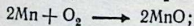
Глава II. ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА

§ 1. Металлургические процессы при сварке

Важнейшими при сварке являются процессы окисления, раскисления, легирования и рафинирования металла. При сварке без защиты расплавляемый металл интенсивно поглощает азот и кислород из воздуха, двуокиси углерода, паров воды, ржавчины и высших окислов. Реакции протекают по следующим схемам:

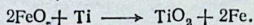
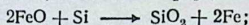
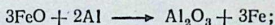


Окисление кремния, марганца и углерода идет по таким схемам:



Вследствие растворения окислов и газов сварные швы имеют низкие механические свойства.

Для нейтрализации действия кислорода применяют раскисление сварочной ванны. Раскислители (алюминий, кремний, марганец, хром, титан) вводят в расплавленный металл через электродные покрытия, флюсы, присадочный материал. Процесс раскисления протекает по схемам:



При высоких температурах процесс раскисления может протекать за счет взаимодействия с углеродом:

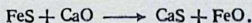


Образовавшаяся окись углерода выделяется в атмосферу и вызывает кипение сварочной ванны, что способствует обезуглероживанию металла и образованию газовых пор.

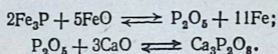
Протекание вышеупомянутых реакций при сварке приводит к изменению состава переплавляемого (обычно качественного) металла и изменению его свойств.

Для повышения механических свойств сварного шва и пополнения выгоревших при сварке элементов основного состава применяют *легирующие*. Легирующие элементы вводят в расплавленный металл через флюс, обмазку и присадочную проволоку. При этом следует учитывать, что вводимые легирующие элементы при сварке частично выгорают и не полностью переходят в металл шва. Раскисленный металл лучше усваивает легирующие элементы.

Для улучшения качества сварного соединения металл шва *рафинируют*, очищая от серы и фосфора. Сера в металле образует сернистое железо, которое способствует образованию горячих трещин. Серу удаляют введением марганца и окиси кальция:



Сернистый марганец и сернистый кальций не растворяются в жидком металле и полностью переходят в шлак. Фосфор снижает пластичность и способствует неоднородности металла шва. Удаляют фосфор окисью кальция:



Образовавшиеся соединения фосфора переходят в шлак.

§ 2. Свойства электрической сварочной дуги

Дуга — это устойчивый вид разряда, существующий при токе от десятых долей ампера до тысяч ампер. Известно несколько способов возбуждения дугового разряда. По способу В. В. Петрова два электрода сводят до соприкосновения и сразу же разводят на небольшое расстояние. В этот момент между ними возникает дуга. Упрощенное объяснение этого явления следующее. При соприкосновении электродов электрическая цепь замыкается и по ней идет ток. В соответствии с законом Джоуля-Ленца в проводниках выделяется теплота. Место контакта двух электродов, которое обладает самым большим сопротивлением, нагревается сильнее и быстрее остальных участков цепи. При высокой температуре начинается испарение материала электрода и возникает явление *термоэлектронной эмиссии* (термоэмиссия) — испускание электронов под действием теплового возбуждения. Если в этот момент разорвать контакт между электродами, возникает электрическое поле, подобное полю, возникающему между обкладками конденсатора. На катоде, подключенном к отрицательному полюсу источника тока, собираются те электроны, которые вылетают благодаря термоэмиссии. При достаточной напряженности электрического поля возникает явление *автоэлектронной эмиссии* — испускание электронов с поверхности катода под действием электростатических сил. В результате этих процессов в пространстве между электродами появляются свободные электроны, которые, сталкиваясь с молекулами и атомами газа и испарившегося электродного металла, «раскалывают» их на ионы и новые электроны (вторич-

ная эмиссия). В ионизированном таким образом пространстве развивается дуговой разряд.

В установившейся сварочной дуге конец электродного стержня и поверхность изделия расплавлены, так что дуга горит между жидкими электродами (рис. 4.6). Столб дуги имеет обычно коническую или сферическую форму, расширенную от электродного стержня к изделию. Пламя имеет значительные размеры и содержит главным образом пары материалов электродов, реагирующие с окружающим воздухом. Поверхность жидкой ванны на изделии не плоскогоризонтальна. Она вдавливается под действием механических сил, создаваемых дугой. Образующееся углубление (ямка) в жидком металле называют кратером. Дуга расплавляет металл на определенную глубину h (глубина расплавления, глубина провара, или просто провар).

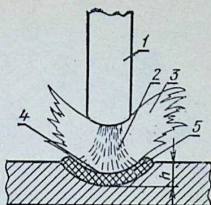


Рис. 4.6. Схема установившейся сварочной дуги:

1 — электрод; 2 — столб дуги; 3 — пламя дуги; 4 — кратер; 5 — сварочная ванна; h — глубина расплавления.

Столб дуги заполнен заряженными частицами. Почти всегда в нем присутствуют нейтральные атомы и даже молекулы паров веществ, из которых сделаны электроды, и газов, окружающих дугу.

На движение частиц оказывают действие силы, вызванные разностью давлений из-за неодинаковой концентрации частиц, кулоновским взаимодействием между электронами и ионами и другими причинами.

Маленькие подвижные электроны быстро перемещаются, легко разгоняются и, сталкиваясь с атомами и ионами, передают им свою энергию. Столкновения электронов с атомами бывают упругими и неупругими.

При упругих столкновениях ничего заметного не происходит. Эти столкновения похожи на удары теннисных мячей. Атом, в который попал электрон, начинает двигаться быстрее (увеличивается его кинетическая энергия). В результате повышается температура плазмы.

Тот электрон, который в электрическом поле приобрел достаточную энергию, участвует в неупругих столкновениях (рис. 4.7). Попав в атом (молекулу), он воз-

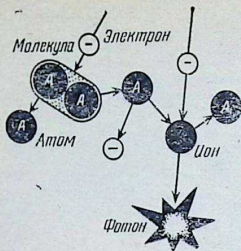


Рис. 4.7. Схема неупругих столкновений.

буждает его, а когда удар достаточно силен, то и выбивает из атома его собственные электроны. Атом становится однозарядным положительным ионом, если выбит один электрон, двухзарядным — если два и т. д.

Сложные процессы идут у поверхности электродов. Именно здесь прерывается течение электронов по металлическому проводнику (электроду) и начинается другой вид тока (ток дуги),

который создается как электронами, так и ионами. Изменяется характер явлений не только электрических, но и термических. Здесь горячая плазма граничит со сравнительно холодной (2...3 тыс. °С) поверхностью электродов.

Кроме электрического поля, на поведение частиц в столбе дуги влияет еще много факторов: термическая диффузия — стремление разогретых частиц «разбежаться» в разные стороны; пинч-эффект — воздействие магнитного поля, возникающего вокруг столба и стремящегося его сжать и др. В зависимости от условий, в которых существует дуга, влияние этих факторов может ослабевать или усиливаться.

При сварке применяют *прямую и обратную полярность*. При прямой полярности минус источника тока подключают к электроду, плюс — к свариваемой детали, а при обратной полярности наоборот.

При сварке угольным электродом на постоянном токе и прямой полярности дуга легче возбуждается и устойчивее, чем при сварке на обратной полярности. При использовании металлических плавящихся электродов полярность дуги меньше влияет на ее устойчивость, поэтому сварку осуществляют как на переменном, так и на постоянном токе с прямой и обратной полярностью в зависимости от состава покрытия электродов и флюсов.

При сварке металлическим электродом длина дуги до 4 мм и не более 0,6...0,8 диаметра электрода (корот-

кая дуга). При сварке длинной дугой (больше 4 мм) увеличивается разбрызгивание, окисление металла, снижается качество шва.

§ 3. Источники питания сварочной дуги

Для питания сварочной дуги того или иного типа необходим источник тока со специальной вольт-амперной характеристикой a (рис. 4.8). Опытная зависимость напряжения дуги от тока при постоянных значениях длины дуги изображена кривой b .

При токе, обычно применяемом при ручной дуговой сварке, напряжение дуги почти не зависит от его силы. Напряжение источника тока должно уменьшаться с увеличением сварочного тока, а его характеристика должна пересекать характеристику дуги в двух точках (1 и 2). В точке 1 происходит возбуждение дуги, а в точке 2 обеспечивается устойчивое ее горение. В момент короткого замыкания в точке 3 напряжение источника тока уменьшается до нуля. Напряжение при ручной дуговой сварке металлическим электродом на постоянном токе должно быть 45...65 В, а с применением переменного тока — 55...100 В.

С 1975 г. для электросварочного оборудования принята единая структура обозначения. Обозначение типов изделий, выпускаемых заводами, состоит из буквенной и цифровой части. Первая буква обозначает тип изделия (Т — трансформатор, В — выпрямитель, Г — генератор, У — установка, П — преобразователь); вторая буква — вид сварки (Д — дуговая, П — плазменная); третья буква — способ сварки (Ф — под флюсом, Г — в защитных газах, У — универсальные источники для нескольких способов сварки); отсутствие буквы означает ручную сварку штучными электродами; четвертая буква дает дальнейшее пояснение назначения источника (М — для многопостовой сварки, И — для импульсной сварки). Две (одна) цифры после букв означают номинальный сварочный ток источника (округленно в сотнях ампер); две последующие цифры (например, 0,2) — регистрационный номер изделия; следующие буквы и цифры — климатическое исполнение (У, Т) и категорию размещения (2, 3, 4). Например, изделие ВДГМ-1602У3 расшифровывают так: выпрямитель для дуговой сварки в среде защитных газов многопостовый

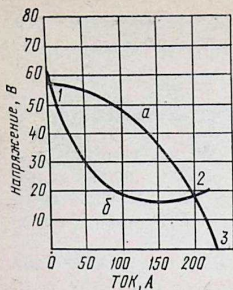


Рис. 4.8. Вольт-амперные характеристики источника сварочного тока (а) и сварочной дуги (б): 1 — возбуждение дуги; 2 — устойчивое горение дуги; 3 — короткое замыкание.

на ток 1600 А, регистрационный номер изделия 0,2, климатическое исполнение У, категория размещения 3.

Источники питания постоянного тока — это сварочные преобразователи, генераторы и выпрямители; переменного тока — сварочные трансформаторы.

Сварочные преобразователи ПСО-500, ПСО-300 (рис. 4.9) однокорпусного исполнения используют при ручной, автоматической и полуавтоматической сварке. Преобразователи работают по принципу самовозбуждения и имеют крутопадающую внешнюю характеристику.

Сварочные преобразователи ПСГ-300, ПСГ-500 имеют жесткую вольт-амперную характеристику и предназначены для питания дуги при автоматической и полуавтоматической сварке в среде защитных газов плавящимся электродом.

Сварочный преобразователь ПСУ-500 может работать в режиме крутопадающей и жесткой вольт-амперной характеристики.

В последние годы вращающиеся преобразователи вытесняются выпрямительными установками, имеющими лучшие технологические свойства и более высокие технико-экономические и эксплуатационные показатели. Сварочные генераторы не утратили своего значения при сварке в полевых условиях в составе сварочных агрегатов с двигателями внутреннего сгорания.

Сварочные генераторы ГСО-300, ГСО-500 имеют крутопадающую характеристику. Их обычно монтируют с трехфазным асинхронным двигателем марки АВ2-71-2-В или с различными двигателями внутреннего сгорания. Генератор ГСО-300 входит в состав сварочных агрегатов с бензиновыми и с дизельными двигателями, а также в состав преобразователей ПСО-300-2У2, ПСО-300-212, ПСО-315-МУ2.

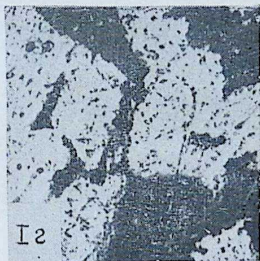
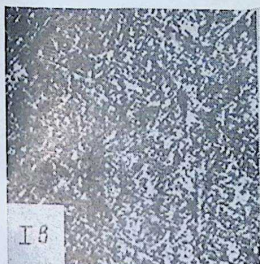
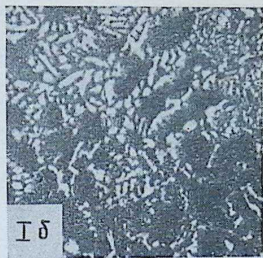
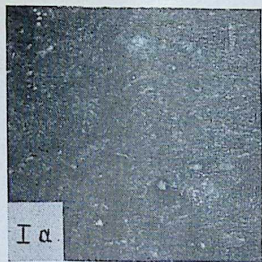


Рис. I. Микроструктуры сплавов системы свинец — сурьма, $\times 500$:

a — свинец; *б* — доэвтектический сплав (5% сурьмы); *в* — эвтектический сплав (13% сурьмы); *г* — заэвтектический сплав (50% сурьмы); *д* — сурьма.

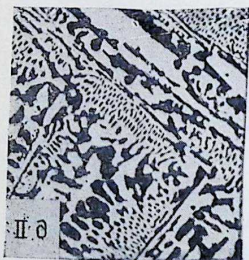
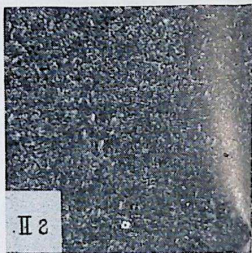
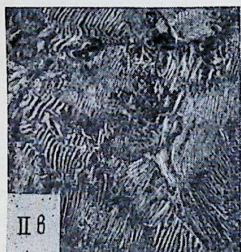
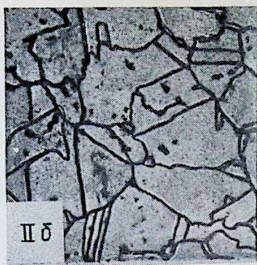
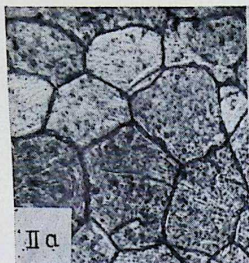


Рис. II. Микроструктура железоуглеродистых сплавов (основные структурные составляющие), $\times 500$:

a — феррит; *б* — аустенит; *в* — перлит пластинчатый; *г* — перлит зернистый; *д* — ледобурит.

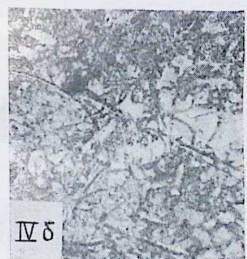
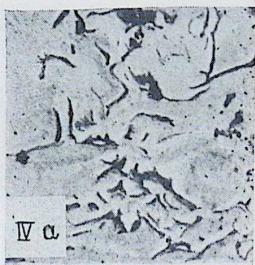
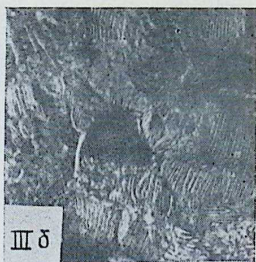
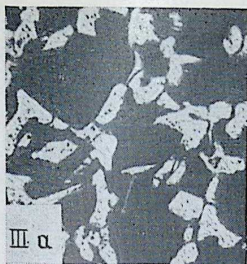
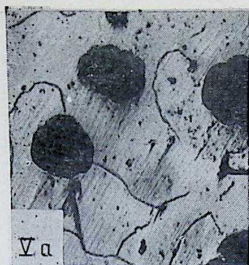


Рис. III. Микроструктуры стали, $\times 500$:

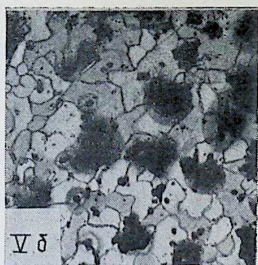
a — доэвтектондной (феррит+перлит); *б* — эвтектондной (перлит); *в* — заэвтектондной (перлит+цементит).

Рис. IV. Микроструктура серого чугуна, $\times 500$:

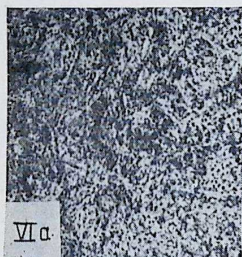
a — до травления; *б* — после травления.



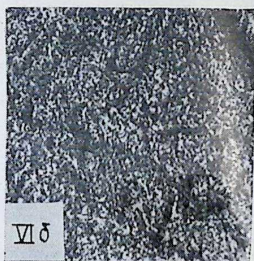
Vα



Vδ



VIα



VIδ



VIβ

Рис. V. Микроструктуры чугунов, $\times 500$:

a — высокопрочный чугун; *б* — ковкий чугун.

Рис. VI. Продукты изотермического распада аустенита:

a — сорбит, $\times 500$; *б* — троостит, $\times 500$; *в* — троостит, $\times 10\ 000$.

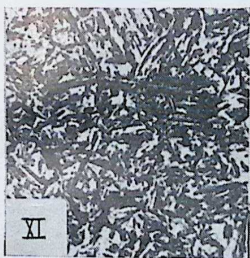


Рис. VII. Микроструктура мартенсита, $\times 500$.

Рис. VIII. Микроструктура мартенсита и остаточного аустенита, $\times 500$.

Рис. IX. Микроструктура отпущенного мартенсита, $\times 500$.

Рис. X. Микроструктура мартенсита и избыточного феррита, $\times 500$.

Рис. XI. Микроструктура крупнольчатого мартенсита, $\times 500$.

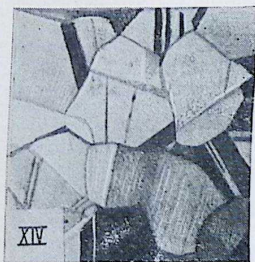
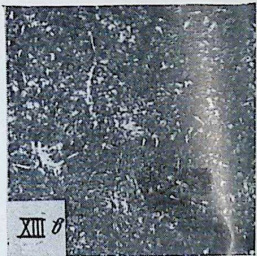
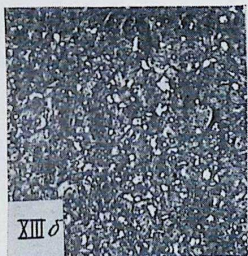
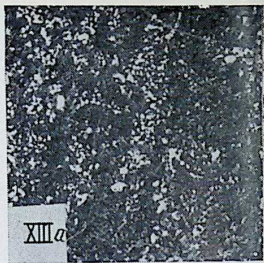
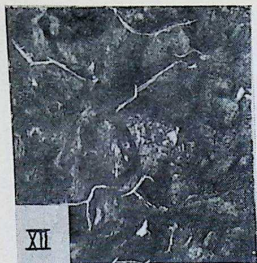


Рис. XII. Микроструктура цементированного слоя, $\times 500$.

Рис. XIII. Микроструктура быстрорежущей стали P18, $\times 500$:

a — после обработки давлением и отжига; *b* — после закалки; *v* — после закалки и отпуска.

Рис. XIV. Микроструктура меди, $\times 500$.

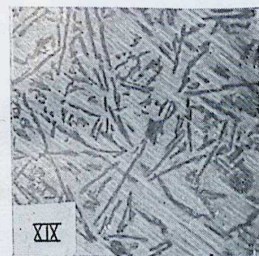
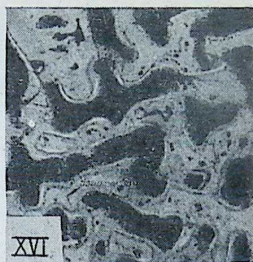
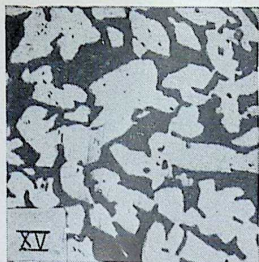


Рис. XV. Микроструктура двухфазной латуни ($\alpha + \beta$ -фазы), $\times 500$.

Рис. XVI. Микроструктура литой бронзы (10% олова), $\times 500$.

Рис. XVII. Микроструктура свинцовой бронзы, $\times 500$.

Рис. XVIII. Микроструктура дюралюмина, $\times 500$.

Рис. XIX. Микроструктура алюминия до модифицирования, $\times 500$.

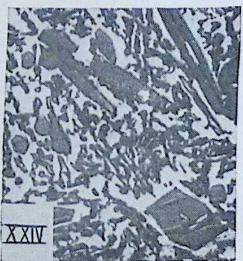
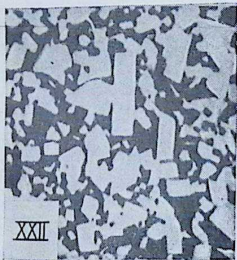
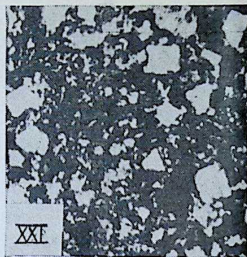
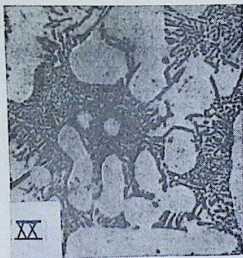


Рис. XX. Микроструктура кремния после модифицирования $\times 500$.

Рис. XXI. Микроструктура баббита Б83, $\times 500$.

Рис. XXII. Микроструктура твердого сплава ВК15, $\times 500$.

Рис. XXIII. Микроструктура твердого сплава Т15К6, $\times 500$.

Рис. XXIV. Микроструктура сплава сор-майт-2, $\times 500$.

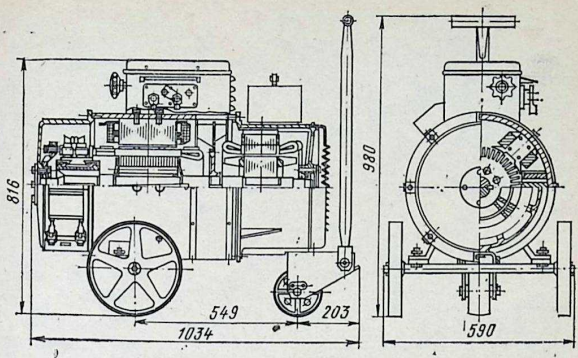


Рис. 4.9. Сварочный преобразователь ПСО-300.

Сварочные выпрямители ВСС-300-3, ВКС-5001, ВД-302 предназначены для ручной дуговой сварки, выпрямители ВДГ-302, ВДП-601 предназначены для комплектации сварочных полуавтоматов унифицированной серии для механизированной сварки в среде углекислого газа. Сварочные выпрямители могут иметь крутопадающую и жесткую характеристику. Выпрямители экономичнее, чем сварочные преобразователи и генераторы, удобнее в эксплуатации, обладают лучшими динамическими свойствами.

Современные источники питания переменного тока, серийно выпускаемые отечественными заводами, можно разделить на две группы. Первая группа источников переменного тока предназначена для питания одного поста при ручной дуговой сварке штучными электродами и при механизированной сварке под флюсом. Вторая группа источников переменного тока предназначена для сварки изделий из легких сплавов, в состав которых входят элементы, образующие на поверхности свариваемых металлов тугоплавкие пленки, препятствующие нормальному сплавлению. В этом случае сварку ведут неплавящимся вольфрамовым электродом в среде защитного газа от специализированных источников питания, которые называют установками.

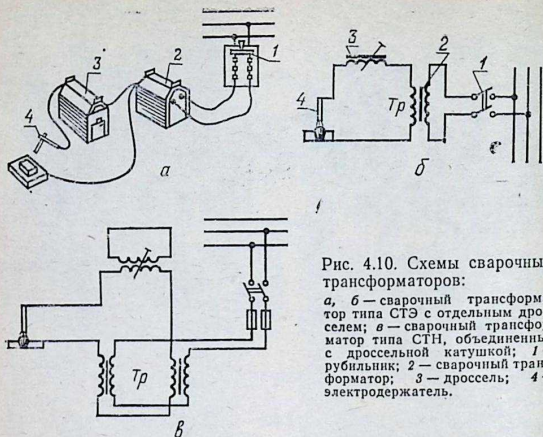


Рис. 4.10. Схемы сварочных трансформаторов:

а, б — сварочный трансформатор типа СТЭ с отдельным дросселем; *в* — сварочный трансформатор типа СТН, объединенный с дроссельной катушкой; 1 — рубильник; 2 — сварочный трансформатор; 3 — дроссель; 4 — электродержатель.

Трансформаторы для ручной дуговой сварки выпускают в передвижном (ТД-300, ТД-500, ТД-501) и в переносном (ТД-102, ТД-306) исполнениях. Они рассчитаны на неустойчивый режим работы и имеют внешние характеристики падающей формы.

Трансформаторы ТДФ-1001 и ТДФ-1601 стационарные и предназначены для механизированной дуговой сварки под флюсом.

Установки УДГ-301 и УДГ-501 рассчитаны на повторно-кратковременный режим работы при принудительном воздушном охлаждении. Сварку производят однофазным переменным током неплавящимся вольфрамовым электродом в среде аргона.

Трансформаторы СТЭ-34 завода «Электрик» состоят из понижающего трансформатора и отдельного регулятора тока.

Сварочные трансформаторы СТН, разработанные академиком В. П. Никитиным, объединены с дроссельной катушкой и предназначены для питания дуги при сварке на токе 500, 1000, 2000 А. Трансформаторы СТН используют для питания дуги при ручной или автомати-

ческой сварке как однопостовые электросварочные машины (рис. 4.10).

Сварочные трансформаторы ТСП-2 и СТШ-250 имеют небольшую массу и рекомендуются для ручной электродуговой сварки в условиях ремонтных мастерских сельскохозяйственных предприятий.

§ 4. Технология ручной электродуговой сварки

В настоящее время ручную дуговую сварку в основном осуществляют по способу Н. Г. Славянова, металлическим плавящимся электродом.

Оборудование рабочего места для ручной дуговой сварки состоит из сварочного аппарата постоянного или переменного тока, сварочного стола, стеллажа, предохранительного щитка, электродержателя и различных сварочных приспособлений. Рабочий пост сварщика находится в изолированной кабине, снабженной приточно-вытяжной вентиляцией (рис. 4.11).

Дугу возбуждают двумя способами: прикосновением торца электрода к свариваемому изделию с последующим его отводом на расстояние 3...4 мм или быстрым боковым движением электрода по направлению к свариваемому изделию с последующим отводом (подобно зажиганию спички). Прикосновение электрода к изделию должно быть мгновенным, иначе он приваривается.

Устойчивый дуговой разряд сварщик поддерживает, опуская электрод по мере его сжигания. Кроме того, электрод перемещают вдоль оси шва для его заполнения и сообщают электроду поперечно-колебательные движения для лучшего проплавления свариваемых кромок и получения уширенного ва-

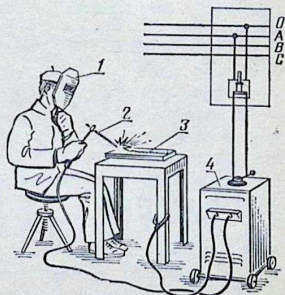


Рис. 4.11. Пост ручной дуговой сварки:

1 — предохранительный щиток; 2 — электрод; 3 — свариваемое изделие; 4 — сварочный трансформатор.

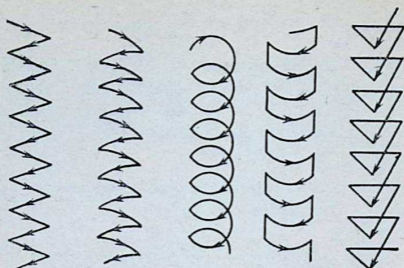


Рис. 4.12. Движения электрода при ручной электродуговой сварке.

лика (рис. 4.12). Электрод держат под углом $15...20^\circ$ к вертикали в направлении сварки.

Режим ручной дуговой сварки определяется диаметром электрода, сварочным током, длиной дуги, напряжением на дуге, скоростью перемещения электрода вдоль шва и полярностью.

Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины свариваемых изделий. При этом можно ориентировочно руководствоваться следующими данными:

толщина изделий, мм	1,5	2	2...5	5...10	свыше 10
диаметр электрода, мм	1,6	2	2,5...4	4...6	4...8

Силу тока выбирают в зависимости от диаметра электрода и вида шва. Для увеличения производительности сварки ток следует максимально увеличивать, но чрезмерное его увеличение может привести к повышенному нагреву электрода, осыпанию покрытия, увеличению разбрызгивания металла и ухудшению качества шва. Силу сварочного тока для низкоуглеродистых сталей рассчитывают по формуле академика К. К. Хренова:

$$I_{св} = (20 + 6d_{эл}) d_{эл},$$

где $I_{св}$ — сила сварочного тока, А; $d_{эл}$ — диаметр электрода, мм.

При толщине свариваемого материала меньше $1,5 d_{эл}$ ток уменьшают на $10...15\%$, а при толщине более $3d_{эл}$ увеличивают на $10...15\%$ по сравнению с полученным расчетным путем. При сварке вертикальных и потолоч-

ных швов во избежание стекания металла ток уменьшают на 15...20%.

Длина дуги существенно влияет на качество шва (чем короче дуга, тем выше качество). Длину дуги определяют по формуле:

$$l_d = 0,5(d_{эл} + 2),$$

где l_d — длина дуги, мм; $d_{эл}$ — диаметр электрода, мм.

Напряжение на дуге при ручной сварке изменяется в небольших пределах. При сварочном токе более 100 А напряжение горения дуги зависит только от длины дуги и определяется по формуле:

$$U_d = \alpha + \beta l_d,$$

где U_d — напряжение дуги, В; α — коэффициент, характеризующий падение напряжения на электродах (при стальных электродах $\alpha = 10...12$, при угольных $\alpha = 35...38$); $\beta = 2...2,5$ — коэффициент, характеризующий падение напряжения на 1 мм длины столба дуги.

Обычно напряжение на дуге для стальных электродов составляет 20...28 В. Напряжение зажигания дуги постоянного тока равно 40...60 В, переменного — 50...70 В.

Производительность сварки зависит от затрачиваемого времени и диаметра электрода. Полное время определяют по формуле:

$$T_n = t_o / K,$$

где t_o — основное время горения дуги, ч; $K = 0,4...0,8$ — коэффициент загрузки сварщика в зависимости от вида производства и характера выполняемой работы.

Основное время горения дуги можно определить по формуле:

$$t_o = Q / I_{св} K_n,$$

где Q — количество наплавленного металла, г; $I_{св}$ — сварочный ток, А; K_n — коэффициент наплавки. Количество электродного металла в граммах, наплавленного в течение 1 ч и приходющегося на 1 А сварочного тока с учетом марки электрода, потерей металла на угар и разбрызгивание. Для тонкообмазанных электродов $K_n = 7...8$ г/А·ч, для толстообмазанных $K_n = 10...12$ г/А·ч и выше.

Массу наплавленного металла определяют по формуле:

$$Q = F_{ш} L_{ш} \rho,$$

где $F_{ш}$ — площадь поперечного сечения шва, см²; $L_{ш}$ — длина шва, см; ρ — плотность наплавленного металла, г/см³.

Скорость ручной сварки выбирают с таким расчетом, чтобы получить слой наплавленного металла определенной ширины и длины. Для однослойных швов скорость определяют по формуле:

$$v_{св} = L_{ш} / t_0,$$

где $L_{ш}$ — длина шва, м.

Расход электродов подсчитывают по формуле:

$$Q_э = (1,2 \dots 1,3) Q.$$

Расход электродов на угар, разбрызгивание и огарки составляет до 25% всей его массы.

Расход электроэнергии на 1 кг наплавленного металла без учета потерь холостого хода определяют по формуле:

$$\mathcal{E} = U_d I_{св} t_0.$$

При ручной сварке на постоянном токе обычно $\mathcal{E} = 7 \dots 8$ кВт·ч/кг, а на переменном — 3,5 кВт·ч/кг.

Полярность выбирают с учетом того, что анод нагревается в процессе сварки больше, чем катод, поэтому во избежание прожога тонкие изделия сваривают током обратной полярности.

§ 5. Электроды для дуговой сварки и наплавки

Электродами называют металлические и угольные стержни, предназначенные для электродуговой сварки и резки металлов.

Электроды для ручной дуговой сварки делят на *неплавящиеся* и *плавящиеся*. К первым относятся угольные, графитовые и вольфрамовые, ко вторым — электроды, имеющие стержень из стали, меди, чугуна, алюминия и различных сплавов. Как правило, они имеют специальные покрытия, которые служат для повышения устойчивости горения дуги и улучшения качества наплавленного металла.

Покрытия электродов бывают *тонкие* (стабилизирующие) и *качественные* (толстые). Тонкие наносят слоем 0,1...0,3 мм, толстые — слоем 0,5...2,5 мм. В состав качественных покрытий электродов входят стабилизирую-

щие, шлакообразующие, газообразующие, раскисляющие, легирующие и связывающие компоненты.

Стабилизирующие вещества вводят в покрытие для снижения потенциала ионизации паров металла и повышения устойчивости горения сварочной дуги.

Шлакообразующие компоненты служат для защиты расплавленного металла от воздействия кислорода и азота воздуха. Они представляют собой окислы металлов и металлоидов, которые вводят в покрытие в виде титанового концентрата (ильменит), марганцевой руды (пиромозит), полевого шпата, мрамора, мела, каолина, кварцевого песка, доломита.

Газообразующие вещества при сгорании создают газовую защитную атмосферу, которая предохраняет расплавленный металл от воздействия кислорода и азота воздуха. Их вводят в покрытие электрода в виде органических соединений (древесная мука, хлопчатобумажная пряжа, крахмал, пищевая мука, декстрин, оксигелюлоза и др.).

Раскисляющие элементы (марганец, кремний, титан, алюминий, графит и др.), находясь в расплавленном металле сварного шва, легче вступают в химические соединения с кислородом, чем железо. Они нерастворимы в стали или обладают ограниченной растворимостью и в виде окислов всплывают на поверхность сварочной ванны. Большинство раскислителей вводят в покрытие не в чистом виде, а в виде ферросплавов.

Легирующие вещества вводят в покрытие для придания наплавленному металлу специальных свойств (повышение механических свойств, износостойкости, жаростойкости, сопротивления коррозии). Наиболее часто применяемые легирующие элементы — хром, никель, молибден, вольфрам, марганец, титан.

Связующие вещества (клеящие) служат для скрепления компонентов покрытия между собой и со стержнем электрода. Обычно применяют жидкое стекло (содовое или калиевое), декстрин, желатин, пластмассы.

Для стальных электродов используют специальную сварочную проволоку, которую выпускают диаметрами 0,3; 0,5; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6; 8; 10 и 12 мм.

Электроды в зависимости от назначения делят на ряд групп:

У — для сварки углеродистых и низколегированных

конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву до 600 Н/мм²;

Л — для сварки легированных конструкционных сталей с временным сопротивлением разрыву свыше 600 Н/мм²;

Т — для сварки легированных теплоустойчивых сталей;

В — для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами;

Н — для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами.

Электроды разделяют на марки по техническим условиям и паспортам. Каждому типу электродов могут соответствовать одна или несколько марок (табл. 1).

1. Наиболее распространенные покрытые электроды и их назначение

Тип электрода	Марка электрода	Назначение
Э-42 Э-42А	АНО-1, АНО-5, АНО-6, СМ-5 УОНИ-13/45, СМ-11, ОЗС-2, УП-2/45	Для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей
Э-46 Э-46А	ЦМ-9, АНО-4, ОЗС-12, МР-3 ИТС-1 (УОНИ-13/45)	
Э-50 Э-50А	ВСН-3, ВСЦ-3 УОНИ-13/45, АНО-9, УП-2/55, ЦУ-1	Для сварки среднеуглеродистых и низколегированных сталей
Э-60 Э-85	УОНИ-13/65 Н-1, ЛКЗ-70, УОНИ-13/85, Ц1-18	
Э-100 Э-125	ВИ-10-6; У-340/105, Ц1-19 НИАТ-3М	Для сварки легированных сталей повышенной прочности

Электроды делят по толщине покрытия в зависимости от отношения D/d (D — диаметр покрытия, d — диаметр стержня):

М — с тонким покрытием ($D/d \leq 1,2$);

С — со средним покрытием ($1,2 < D/d < 1,45$);

Д — с толстым покрытием ($1,45 < D/d < 1,8$);

Г — с особо толстым покрытием ($D/d > 1,8$).

Тип покрытия обозначают следующими буквами:

Р — руднокислое покрытие. Электродами с руднокислым покрытием (ОММ-5, ЦМ-7 и др.) производят сварку в любом пространственном положении шва, с ржавыми кромками и окалиной, переменным и постоян-

ным током. Недостаток их в том, что наблюдается повышенное разбрызгивание металла и выделение соединений, вредно влияющих на организм человека.

Ф — фтористокальциевое покрытие. Электроды с фтористокальциевым покрытием (УОНИ-13/45, ЦЛ-18 и др.) применяют преимущественно при сварке постоянным током обратной полярности, во всех пространственных положениях шва. Они чувствительны к ржавчине, маслу, влаге и удлинению дуги.

Т — рутиловое покрытие. Электроды с таким покрытием (ЦМ-9, ОЗС-3, ОЗС-4 и др.) дают устойчивое горение дуги, хорошее формирование шва, небольшое разбрызгивание, нечувствительны к ржавчине. Их используют при сварке постоянным и переменным током в любом пространственном положении шва.

О — органическое покрытие. Электроды с органическим покрытием (ОМА-2 и др.) имеют умеренное разбрызгивание металла, дают малое количество шлака и пригодны для сварки во всех пространственных положениях шва как переменным, так и постоянным током.

По международной классификации тип покрытия условно обозначают следующими буквами: А — кислое (руднокислое); В — основное (фтористокальциевое); С — органическое (целлюлозное); О — окислительное; R — рутиловое; V — специальное.

Условное обозначение электродов для сварки конструкционных сталей состоит из обозначения марки электрода, типа электрода, диаметра стержня, типа покрытия и номера ГОСТа. Например, условное обозначение электрода УОНИ-13/45-Э-42А-4,0Ф ГОСТ 9467—75 расшифровывают следующим образом: УОНИ-13/45 — марка электрода; Э-42А — тип электрода (Э — электрод для дуговой сварки; 42 — минимальный гарантируемый предел прочности металла, Н/мм²; А — гарантируется получение повышенных пластических свойств металла шва); 4,0 — диаметр электродного стержня, мм; Ф — фтористокальциевый тип покрытия; номер ГОСТа, по которому стандартизирован электрод.

Электроды применяют не только для сварки, но и для наплавки металла на различные детали при их ремонте и восстановлении (табл. 2).

Для сварки чугуна при ремонте тракторов применяют стальную проволоку Св.08, Св.13Х25Н18, Св.06Х19Н9Т, чугунные прутки и стержни марок А, Б,

2. Электроды для наплавки быстроизнашивающихся деталей сельскохозяйственных машин

Тип электрода	Марка электрода	Назначение
Э-10Г2 Э-11Г3 Э-12Г4 Э-15Г5 Э-30Г2ХМ	ОЗН-250У ОЗН-300У ОЗН-350У ОЗН-400У НР-70 ОМГ-Н	Наплавка деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок (оси, валы, автосцепки, крестовины и др.)
Э-65Х11НЗ Э-65Х25Г13НЗ	ЦНИИН-4	Наплавка деталей из высокомарганцовистых сталей марок 110Г13 и 110Г13Л
Э-95Х7Г5С Э-80Х5В2Г2СМ	12АН/ЛИВТ ТКЗ-Н	Наплавка деталей, работающих в условиях интенсивных ударных нагрузок с абразивным изнашиванием
Э-80Х4С Э-320Х23С2ГТР	13КН/ЛИВТ Т-620	Наплавка деталей, работающих в условиях преимущественно абразивного изнашивания
Э-300Х28Н4С4 Э-225Х10Г10С	ЦС-1 ЦН-11	Наплавка деталей, работающих в условиях интенсивного абразивного изнашивания с ударными нагрузками

ЭМ4, АМ4, чугунные прутки для низкотемпературной сварки-пайки марок Н4-1, Н4-2 и некоторые другие.

Для сварки меди и медноникелевых сплавов и в ремонтных целях используют электроды марок «Комсомолец», ЗТ. В состав покрытий указанных марок входят различные раскислители и шлакообразующие компоненты. В качестве электродных стержней для электродов ЗТ используют проволоку из меди М1, проволоку из кремнемарганцевой бронзы Бр.КМцЗ-1, литые стержни из латуни Л90 или оловянисто-фосфористой бронзы Бр.ОФ-4-0,25; для электродов «Комсомолец-100» — медную проволоку М1.

Бронзы сваривают электродами со стержнями из бронзовых прутков и покрытиями, содержащими мрамор, плавиковый шпат и различные раскислители, или покрытиями, состоящими из криолита, хлористого калия, хлористого натрия и древесного угля.

§ 6. Автоматическая и полуавтоматическая электродуговая сварка и наплавка

Наибольшее применение имеет автоматическая и полуавтоматическая сварка плавящимся электродом, под слоем флюса или в среде защитных газов, которая дает более стабильный шов с повышением производительности в 2...8 раз по сравнению с ручной дуговой сваркой.

Основное промышленное применение находит сварка под флюсом одной вертикально расположенной электродной проволокой сплошного сечения (рис. 4.13). Нагрев и плавление основного и присадочного металлов происходят за счет тепла, получаемого при преобразовании подводимой к дуге электрической энергии. Дуга 1 возникает между электродной проволокой 2 и основным металлом 3, подсоединенным к полюсам источника питания. В качестве такого источника используют специальные однофазные или трехфазные сварочные транс-

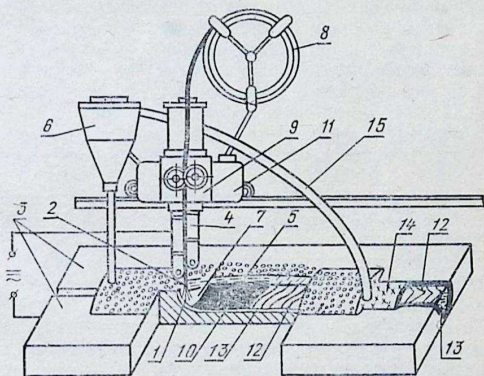


Рис. 4.13. Схема автоматической сварки под слоем флюса:

1 — электрическая дуга; 2 — электродная проволока; 3 — основной металл; 4 — мундштук; 5 — слой флюса; 6 — флюсоаппарат; 7 — прослойка жидкого шлака; 8 — бухта электродной проволоки; 9 — сварочная головка; 10 — сварочная ванна; 11 — тележка для перемещения сварочной головки; 12 — сварной шов; 13 — зона термического влияния; 14 — шлаковая корка; 15 — шланг для возврата флюса в флюсоаппарат.

форматоры переменного тока с пологопадающей внешней характеристикой, генераторы и выпрямители с пологопадающей или падающей внешней характеристикой. Сварку на постоянном токе преимущественно ведут при обратной полярности. Возможна сварка и при прямой полярности.

Подвод тока к электродной проволоке и ориентацию ее конца по отношению к свариваемым кромкам осуществляют мундштуком 4. Ток к изделию подводят через неподвижные или подвижные контактные устройства (струбины, щетки и др.). Режим существования дуги при сварке под слоем флюса определяется силой тока, напряжением и длиной дуги. Обычно применяют силу тока 1000...1200 А, что при открытой дуге невозможно вследствие разбрызгивания металла шва. Сварку ведут короткой дугой. Некоторые современные автоматы поддерживают отклонение длины дуги в пределах $\pm 0,2...0,3$ мм. Напряжение колеблется в пределах 18...55 В.

В процессе сварки электрод и основной металл со всех сторон окружены слоем флюса 5, насыпаемым из флюсоаппарата 6, работающего обычно от заводской сети сжатого воздуха (при массовом производстве). Высоту и ширину слоя устанавливают, исходя из условия обеспечения эффективной изоляции зоны сварки от окружающего воздуха и создания плотного формирующего жидкий металл барьера. Обычная высота слоя флюса 20...60 мм. При нагреве и плавлении флюс выделяет газы и пары, способствующие стабилизации дугового разряда.

Дуга находится в заполненном парами и газами пузыре, сводом которого является прослойка 7 из жидкого шлака. Таким образом, флюс при этом способе сварки защищает расплавленный металл электрода и ванны от воздуха; концентрирует тепло в зоне сварки; замедляет остывание ванны, позволяя попавшим в нее газам выйти наружу; облегчает ионизацию дугового промежутка, обеспечивая стабильность процесса; легирует металл шва дополнительными элементами; предотвращает выгорание полезных примесей.

Для автоматической сварки применяют плавные и керамические неплавленные флюсы. Керамические неплавленные флюсы представляют собой крупинки (гранулы) размером 1...3 мм, изготовленные из материалов, входящих в состав обычных покрытий электродов для

электродуговой ручной сварки. По характеру шлака различают кислые и основные флюсы, а по назначению — для сварки низкоуглеродистых сталей, легированных спецсталей, цветных металлов для наплавочных работ и т. д.

Довольно широко применяют флюсы марок АН-348А, ОСЦ-45, АН-15, АВ-5, 48-ОФ-10, в которых основной служат окислы марганца и кремния. Дополнительно в флюс добавляют компоненты для повышения жидкотекучести шлаков (CaF_2), стабилизации горения дуги (CaO , MgO) и легирования металла шва (феррохром, ферротитан и др.).

В качестве электрода для сварки малоуглеродистой и низколегированной стали используют сварочную проволоку марок Св.08, Св.08А, Св.08ГА, Св.18ХМА, Св.10Х16Н25М6 диаметром 1,6; 2; 3 и 4 мм.

При сварке под слоем флюса используют источники питания переменного и постоянного тока с падающей характеристикой: трансформаторы ТДФ-1001, ТДФ-1601, ТШС-1000-3; преобразователи ПСО-300, ПСО-500, ПСГ-500 и выпрямители ВДУ-1001, ВДУ-504, ВДУ-1601 и др.

Для автоматической сварки и наплавки промышленность выпускает аппараты марок АБСК, А1401, А1423, А384МК, А580М, трактора ТС-17М-1, АДС-1004-04, АДФ-1001, ТС-44, ДТС-38 и др.

Полуавтоматическая сварка отличается от автоматической тем, что применяют более тонкую электродную проволоку и сварщик перемещает полуавтомат вдоль выполняемого шва вручную. Промышленность выпускает полуавтоматы общего применения АК65, А1197С и специализированные А1114М, А1530.

При ремонте сельскохозяйственной техники широко используют наплавку под слоем флюса для восстановле-

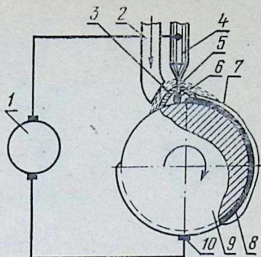


Рис. 4.14. Схема наплавки под слоем флюса:

1 — источник питания электрической дуги; 2 — приспособление для подачи флюса; 3 — оболочка шлака; 4 — мундштук; 5 — электродная проволока; 6 — электрическая дуга; 7 — шлаковая корка; 8 — наплавленный слой; 9 — деталь; 10 — подвод тока к детали.

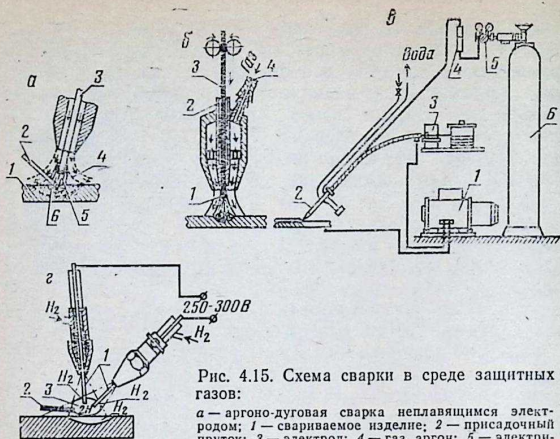


Рис. 4.15. Схема сварки в среде защитных газов:

а — аргоно-дуговая сварка неплавящимся электродом; 1 — свариваемое изделие; 2 — присадочный пруток; 3 — электрод; 4 — газ аргон; 5 — электрическая дуга; 6 — ванна жидкого металла; *б* — аргоно-дуговая сварка плавящимся электродом: 1 — электрическая дуга; 2 — наконечник горелки; 3 — электродная проволока; 4 — канал для подвода аргона; *в* — сварка в атмосфере углекислого газа: 1 — источник питания электрической дуги; 2 — газозлектрическая горелка; 3 — механизм подачи электродной проволоки; 4 — ротаметр; 5 — редуктор; 6 — баллон с углекислым газом; *г* — атомно-водородная сварка: 1 — вольфрамовые или угольные электроды; 2 — присадочный металл; 3 — зона сварки.

ния геометрических размеров изношенных деталей (рис. 4.14).

Для защиты металла от воздействия воздуха, кроме шлакового покрытия, применяют газовую защиту вокруг дуги и расплавленного металла. В качестве защитных применяют инертные (аргон, гелий) и активные газы (водород, окись углерода или их смесь с азотом). Наибольшее распространение получили аргоно-дуговая сварка и сварка в среде углекислого газа.

При **аргоно-дуговой сварке** неплавящимся электродом (рис. 4.15, *а*) через специальную горелку, в которой установлен вольфрамовый электрод 3, пропускают инертный газ (аргон или гелий). Возбуждение дуги происходит между электродом и свариваемым изделием. Для заполнения разделки кромок в зону вводят присадочный материал 2, химический состав которого близок к составу сва-

риваемого материала. Применяют электроды диаметром 2...6 мм. Аргон подают в горелку под давлением 0,03...0,05 МПа.

Аргоно-дуговую сварку применяют для сварки легированных сталей, алюминия и его сплавов, титана, магниевых сплавов.

В ряде случаев сварку выполняют и плавящимся электродом. В этом случае применяют проволоку диаметром 0,6...3 мм, которую автоматически подают в наконечник 2 горелки (рис. 4.15, б). Защитный газ через специальный канал 4 наконечника горелки попадает в пламя дуги 1.

Атомно-водородная сварка — разновидность сварки в среде защитных газов (рис. 4.15, г). Особенность процесса заключается в том, что молекулярный водород под влиянием высокой температуры дуги в промежутке между электродами превращается в атомарный. В нижней части дуги при соприкосновении газа с холодным свариваемым металлом атомарный водород превращается в молекулярный. При этом выделяется значительное количество тепла. Сварочная дуга возбуждается между двумя электродами 1 (вольфрамовые или угольные).

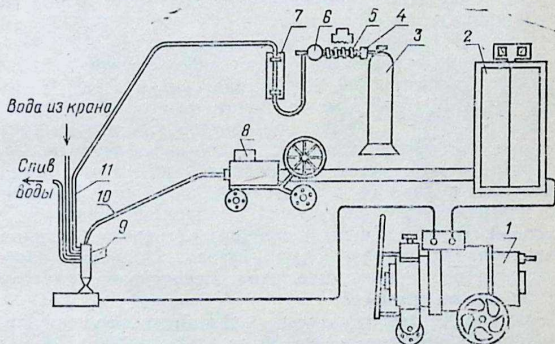


Рис. 4.16. Схема установки для наплавки в среде углекислого газа: 1 — сварочный генератор; 2 — аппаратный ящик; 3 — баллон с углекислым газом; 4 — осушитель газа; 5 — подогреватель газа; 6 — редуктор; 7 — ротаметр; 8 — механизм подачи сварочной проволоки; 9 — газозащитная горелка; 10 — шланг для подвода электродной проволоки и тока; 11 — шланг для подачи газа.

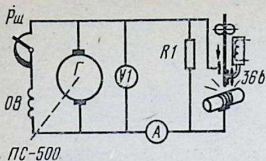


Рис. 4.17. Принципиальная электрическая схема вибродуговой установки.

ется при восстановлении деталей сельскохозяйственных машин, особенно чугуновых (рис. 4.15, в). Процесс наплавки в среде углекислого газа по существу аналогичен процессу сварки (рис. 4.16).

Для наплавки в среде углекислого газа используют электродные проволоки с повышенным содержанием кремния, марганца и титана (Св.08ГС, Св.08Г2С, Св.10ХГ2С и др.). Для образования износостойкого наплавленного слоя применяют порошковые проволоки (ПП-6ХЗВ10, ПП-сормайт-1, ПП-сормайт-2, ПП-10Х10В4 и др.).

Наплавку тел вращения производят, используя токарно-винторезный станок.

Для восстановления изношенных деталей в ремонтной практике нередко применяют **вибродуговую наплавку**, в основе которой — контактная сварка и электрическая дуга. Наплавку можно вести на воздухе, в среде защитного газа, в жидкости. Процесс состоит из трех этапов: замыкание электрода с деталью, размыкание, холостой ход. В момент короткого замыкания конец электрода оплавляється. При отрыве электрода перемычка взрывообразно разрушается и процесс переходит в дуговой. В этот момент и происходит перенос металла электрода на наплавляемую деталь. Наплавку чаще ведут на постоянном токе, что обеспечивает лучшую стабильность процесса.

Установки для автоматической вибродуговой наплавки обычно монтируют на базе токарно-винторезных станков, на суппорте которых устанавливают вибродуговую головку ЭВГ-2, КУМА-5М, ОКС-1252 и др. (рис. 4.17).

Напряжение источника тока составляет 250...350 В, рабочее напряжение — 30...120 В; сварочный ток — 10...70 А. Присадочный металл 2 вводят в зону сварки 3 обычным способом.

Сварка в углекислом газе — наиболее дешевый способ по сравнению с другими видами сварки в защитных средах — широко применяется

§ 7. Контактная сварка

Контактная сварка — процесс соединения деталей нагревом их в месте контакта до пластического или жидкого состояния с одновременным или последующим сильным сжатием (осадка), обеспечивающим взаимодействие атомов металла.

По форме свариваемого соединения, определяющего тип сварочной машины, контактную сварку разделяют на стыковую, точечную и роликовую. При всех видах контактной сварки металл нагревается за счет выделения тепла при прохождении электрического тока по свариваемым деталям. Количество этого тепла определяют по закону Джоуля-Ленца:

$$Q = 0,24I_{св}^2 R t,$$

где $I_{св}$ — сварочный ток, А; R — сумма сопротивлений отдельных участков цепи, Ом; t — время протекания тока, с.

При контактной стыковой сварке детали закрепляют в зажимах стыковой сварочной машины и пропускают через них электрический ток (рис. 4.18, а). В месте соприкосновения (контакта) торцы деталей разогреваются до

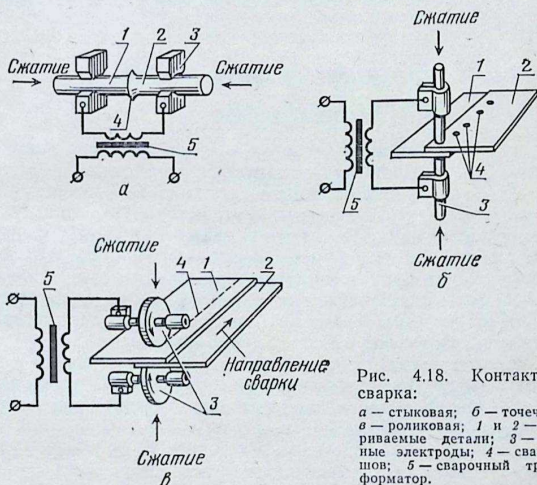


Рис. 4.18. Контактная сварка:

а — стыковая; б — точечная; в — роликовая; 1 и 2 — свариваемые детали; 3 — медные электроды; 4 — сварной шов; 5 — сварочный трансформатор.

пластического состояния или до плавления и свариваются при сдавливании. Данный способ применяют при соединении проволоки, стержней, труб, полос.

При **точечной сварке** (рис. 4.18, б) размеченные под сварку детали устанавливают внахлестку и помещают между двумя вертикально расположенными медными электродами, к которым подводят ток. Металл под электродами разогревается и при сдавливании сваривается в отдельных точках. Этим способом сваривают тонкий металл при изготовлении автомобилей, пассажирских вагонов, самолетов, бытовых приборов. В настоящее время точечную сварку широко применяют при ремонте автомобилей.

При **роликовой сварке** (рис. 4.18, в) детали сжаты вращающимися электродами (ролики), через которые пропускают сварочный ток для нагрева и расплавления металла. Ток можно пропускать кратковременными импульсами или непрерывно. В результате каждого импульса образуется сварная точка, причем для получения плотного шва каждая последующая точка должна перекрывать предыдущую. Этот вид сварки применяют при изготовлении тонкостенных баллонов, бидонов, бензобаков и др.

Глава III. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ СВАРКИ

§ 1. Холодная сварка

Холодная сварка — один из видов сварки в твердом состоянии со значительной объемной пластической деформацией и малой степенью ее локализации в зоне контакта соединяемых материалов. Основной технологический вариант холодной сварки предусматривает совместную пластическую деформацию соединяемых деталей за счет приложения сил, нормальных к поверхности соединения. Иногда для интенсификации и облегчения относительных смещений соединяемых поверхностей дополнительно прилагают тангенциальные усилия.

Холодную сварку нормальными усилиями осуществляют внахлестку вдавливанием пуансонов в предварительно зажатые или незажатые детали или встык с использованием зажимных приспособлений (рис. 4.19). Для получения качественного соединения в обоих случаях необходимо значительное растекание металла в

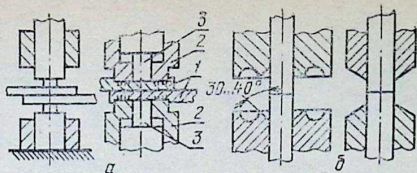


Рис. 4.19. Холодная сварка внахлестку без зажатия и с зажатием свариваемых деталей перед сваркой (а) и встык с зажимами, ограничивающими деформацию в большей или меньшей степени (б):

1 — свариваемые детали; 2 — прижимы; 3 — пуансоны.

месте соединения, которое способствует разрушению и выносу окисных пленок из зоны контакта, сглаживанию поверхностных микронеровностей и образованию активных центров схватывания.

Холодной сваркой соединяют листы толщиной 0,2...15 мм, проволоку (встык), заваривают отверстия труб, сваривают полые детали по контуру. Соединение выполняют точками или непрерывным швом. Давление выбирают в зависимости от состава и толщины свариваемого материала. В среднем оно составляет 150...1000 МПа.

Оборудованием для холодной сварки служат винтовые, гидравлические, рычажные, эксцентриковые прессы. В зависимости от типа соединения и размера свариваемых деталей разрабатывают соответствующие сварочные установки и полуавтоматы.

§ 2. Сварка взрывом

При сварке взрывом химическая энергия превращения заряда взрывчатого вещества (ВВ) в газообразные продукты взрыва трансформируется в механическую энергию их расширения, сообщая одной из свариваемых частей большую скорость перемещения. Кинетическая энергия соударения движущейся части с поверхностью неподвижной части затрачивается на работу совместной пластической деформации контактирующих слоев металла, приводящей к образованию сварного соединения. Работа пластической деформации переходит в тепло, которое вследствие адиабатического характера процесса может разогревать металл в зоне соединения

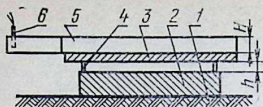


Рис. 4.20. Принципиальная схема сварки взрывом:

1 — основание; 2 и 3 — свариваемые детали; 4 — технологические опоры; 5 — заряд взрывчатого вещества; 6 — детонатор.

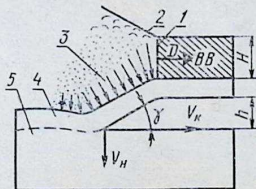
до высоких температур (вплоть до оплавления локальных объемов).

При сварке взрывом (рис. 4.20) на основании 1 (земляной грунт, дерево, металл и т. п.) расположена одна из свариваемых деталей 2 (в простейшем случае пластина); над ней параллельно с определенным зазором h расположена вторая деталь 3 на технологических опорах 4. На ее внешней поверхности находится заряд ВВ 5 заданной высоты H и площади, как правило, равной площади пластины 3 (наиболее широко применяемые для сварки взрывом насыпные ВВ помещают в открытом контейнере соответствующих размеров). В одном из концов заряда ВВ находится детонатор 6.

При инициировании заряда ВВ (рис. 4.21) по нему распространяется фронт детонационной волны со скоростью D , лежащей для существующих ВВ в пределах 2000...8000 м/с. Образующиеся позади заряда газообразные продукты взрыва в течение короткого промежутка времени по инерции сохраняют прежний объем ВВ, находясь в нем под давлением $(1...2) \cdot 10^{10}$ Па, а затем со скоростью $(0,5...0,75) D$ расширяются по нормальям к свободным поверхностям заряда, сообщая находящемуся под ним участку металла импульс, под действием которого объемы изделия последовательно вовлекаются в ускоренное движение к поверхности неподвижной части металла и со скоростью v_n соударяются с ней и свариваются.

Рис. 4.21. Схема установившегося процесса сварки взрывом:

1 — фронт детонационной волны; 2 — фронт разлета продуктов взрыва ВВ; 3 — фронт волны разряжения; 4 и 5 — свариваемые детали; D — скорость детонации ВВ; V_n — нормальная составляющая скорости соударения контактирующих поверхностей; V_k — скорость движения вершины динамического угла γ встречи контактирующих поверхностей в направлении сварки ($V_k = D$).



Граница между соединенными деталями на микрошлифах имеет вид волнистой линии. Взрывом можно сварить разнородные металлы. Например, к листу из углеродистой стали можно присоединить лист нержавеющей стали, никеля, титана, меди, алюминия и др.

Применение сварки взрывом требует строгого соблюдения правил техники безопасности и хранения взрывчатки. Сварка взрывом достаточно удобна для изготовления отдельных изделий сравнительно простой формы. Регулировать процесс сварки можно лишь приблизительно, так как результат зависит от плотности взрывчатки, равномерности ее размещения и прочих трудноконтролируемых параметров.

§ 3. Ультразвуковая сварка

При сварке ультразвуком неразъемное соединение металлов получают при совместном воздействии на детали механических колебаний высокой частоты (18...80 кГц) и относительно небольших сдвигающих усилий (0,2...4,5 кН), зависящих от вида свариваемого материала. В принципе этот метод сварки имеет много общего с холодной сваркой сдвигом.

Машины для ультразвуковой сварки состоят из следующих основных узлов: источник питания, аппаратура управления, механическая колебательная система, привод давления.

Механическая колебательная система преобразует электрическую энергию в механическую, передает эту энергию в зону сварки и концентрирует ее там. В результате получают необходимую колебательную скорость излучателя.

Колебательная система (рис. 4.22) состоит из электромеханического (магнитострикционный) преобразователя 1 с обмотками, заключенного в металлический корпус 2, охлаждаемый водой; трансформатора упругих колебаний 3, сварочного наконечника 4; опоры с механизмом давления 6. Ультразвук излучается только в момент сварки.

В результате действия ультразвука в тонких слоях контактирующих поверхностей создаются сдвиговые деформации, разрушающие поверхностные пленки. Поверхностные слои металла нагреваются, металл в этих местах размягчается и под действием сжимающего уси-

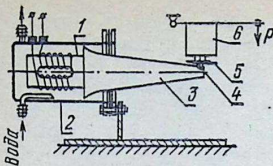


Рис. 4.22. Схема установки для точечной сварки ультразвуком:

1 — электромеханический преобразователь; 2 — металлический корпус; 3 — трансформатор упругих колебаний; 4 — сварочный наконечник; 5 — свариваемые детали; 6 — механизм давления.

лия пластически деформируется. При сближении поверхностей на расстояние действия межатомных сил между ними возникает прочная связь.

Сравнительно небольшое тепловое воздействие обеспечивает минимальные изменения структуры, механических и других свойств. Например, при сварке меди температура в зоне контакта не превышает 600°C , а при сварке алюминия — $200\text{...}300^{\circ}\text{C}$. Ультразвуковой сваркой можно соединять детали различной толщины; хорошо свариваются разнородные материалы.

Ультразвуковым методом сваривают и пластмассы, однако в отличие от сварки металлов ультразвуковые колебания подводят к деталям не тангенциально, а вертикально.

§ 4. Сварка трением

Сварка трением — разновидность сварки давлением. Получение при этом прочного сварного соединения возможно при условии энергичного пластического деформирования тех объемов металла соединяемых деталей, которые расположены вблизи взаимодействующих поверхностей.

Простейшая и наиболее распространенная схема сварки трением показана на рисунке 4.23. Две детали, подлежащие сварке, устанавливают соосно в зажимах машины. Одна деталь неподвижная, а другая приводится во вращение вокруг их общей оси. На сопряженных торцовых поверхностях деталей, прижатых одна к другой осевым усилием P , возникают силы трения. Работа, затрачиваемая при относительном вращении свариваемых заготовок на преодоление сил трения, преобразуется в тепло, которое выделяется на поверхностях трения и нагревает прилегающие к ним тонкие слои металла до температур, необходимых для образования сварного со-

единения (при сварке черных металлов температуры в стыке достигают 1000...1300 °С). Таким образом, в стыке, то есть именно там, где это требуется для сварки, действует внутренний источник тепловой энергии, вызывающий быстрый локальный нагрев небольших объемов металлов.

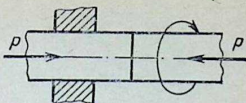


Рис. 4.23. Принципиальная схема процесса сварки трением.

Основными параметрами процесса сварки трением являются частота относительного вращения свариваемых деталей; осевое усилие проковки; длительность приложения усилия проковки. Численные значения этих параметров зависят от свойств материалов и размеров сечений свариваемых изделий. Эти параметры определены экспериментально и сведены в технологические таблицы режимов сварки трением. Трением можно сваривать стержни встык, трубы встык, трубы со стержнем встык, Т-образные соединения стержня и трубы с плоской поверхностью контрдетали, причем хорошо свариваются различные материалы и практически в любом сочетании.

§ 5. Диффузионная сварка

Диффузионная сварка — разновидность сварки давлением — происходит за счет взаимной диффузии атомов контактирующих поверхностей при относительно длительном воздействии повышенной температуры и незначительной пластической деформации. Если процесс соединения протекает при наличии жидкой фазы, то потребность в давлении отпадает, поскольку происходит предварительное смачивание соединяемых поверхностей жидкой пленкой.

При диффузионной сварке две части детали помещают в вакуумную камеру специальной сварочной установки (рис. 4.24). Для защиты детали от интенсивного окисления и азотирования в процессе разогрева и сварки в рабочей камере создают вакуум. Источником нагрева служит высокочастотный генератор, сжимающее усилие обеспечивает гидросистема. После сварки детали охлаждают в вакуумной камере до нормальной температуры.

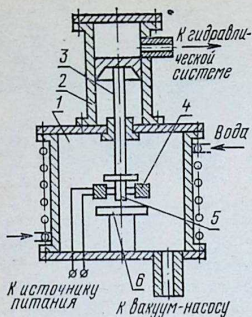


Рис. 4.24. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме:

1 — вакуумная камера; 2 — цилиндр гидропривода; 3 — поршень; 4 — индуктор; 5 — свариваемые детали; 6 — стол для монтажа свариваемых деталей.

определяется установлением плотного контакта между соединяемыми поверхностями и минимальной диффузией атомов через поверхность соединения (1...5 мин).

Диффузионная сварка имеет ряд важных преимуществ: высокое качество сварного соединения, малый расход энергии, гигиеничность, возможность программирования и соединения сложных и точных конструкций. Диффузионную сварку широко применяют в электронной промышленности.

При этом способе сварки необходимы дополнительные затраты времени на вакуумирование рабочего объема камеры и хорошая подгонка соединяемых поверхностей.

§ 6. Сварка электронным лучом

Сущность процесса сварки электронным лучом состоит в использовании кинетической энергии электронов, быстро движущихся в глубоком вакууме. При бомбардировке электронами поверхности металла

При этом способе сварки образование сварного соединения зависит от температуры, давления и времени выдержки.

Температура сварки для однородных металлов должна составлять 0,5...0,7 температуры плавления металла или сплава, а при сварке разнородных — 0,5...0,7 температуры плавления металла с более низкой температурой плавления.

Давление должно быть достаточно, чтобы в результате деформации поверхностей соединяемых деталей все пустоты в области стыка были заполнены.

Для получения прочного соединения время сварки

подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в тепло, которое расплавляет металл.

Свободные электроны испускает раскаленный металлический катод, а их ускорение обеспечивает электрическое поле с высоким потенциалом между катодом и анодом.

Узкие электронные пучки (лучи) с большой плотностью энергии, используемые для сварки, получают в специальном приборе — электронной пушке (рис. 4.25).

Пушка имеет катод 1, который может нагреваться до высоких температур. Катод размещен внутри прикатодного электрода 2. На некотором удалении от катода расположен ускоряющий электрод (анод 3) с отверстием.

Прикатодный и ускоряющий электроды обеспечивают такое строение электрического поля между ними, которое фокусирует электроны в пучок с диаметром, равным диаметру отверстия в аноде. Пушку питают электрической энергией от высоковольтного источника постоянного тока. Электроны, имея одинаковый заряд, отталкиваются одни от других, поэтому для предотвращения увеличения диаметра пучка и уменьшения плотности энергии в нем луч после выхода из анода фокусируют магнитным полем в магнитной линзе 4. Плотный пучок с высокой скоростью ударяет в малую резко ограниченную площадку на изделии 6, нагревая металл до высоких температур.

Для перемещения луча по свариваемому изделию на пути электронов установлена магнитная отклоняющая система 5, позволяющая устанавливать электронный луч точно по линии сварки.

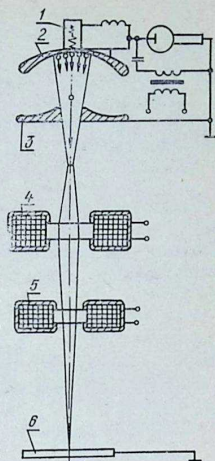


Рис. 4.25. Схема установки для сварки электронным лучом:

1 — катод; 2 — прикатодный электрод; 3 — ускоряющий электрод (анод); 4 — магнитная линза; 5 — магнитная отклоняющая система; 6 — свариваемое изделие.

При этом способе сварки получают узкую и глубокую зону проплавления, изменяют форму пятна нагрева за счет изменения очертаний катода, легко управляют лучом и точно регулируют температуру нагрева, получают соединения как малогабаритных изделий электроники, так и различных изделий длиной и диаметром в несколько метров.

§ 7. Сварка под водой

Дуговая сварка под водой основана на способности дуги устойчиво гореть в газовом пузыре при интенсивном охлаждении окружающей водой (рис. 4.26).

Газовый пузырь образуется за счет испарения и разложения воды, паров и газов расплавленного металла и обмазки электрода. Вокруг горячей дуги выделяется большое количество газов, что приводит к повышению давления в газовом пузыре и частичному выделению газов в виде пузырьков на поверхности воды.

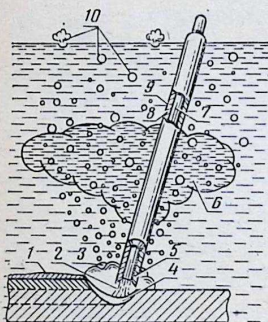


Рис. 4.26. Принципиальная схема горения дуги под водой:

1 — шлак; 2 — дуга; 3 — газовый пузырь; 4 — сварочная ванна; 5 — козырек; 6 — облако муты; 7 — металлический стержень; 8 — обмазка; 9 — водо-непроницаемое покрытие; 10 — пузырьки газа.

Устойчивое горение дуги под водой можно объяснить тем, что усиленное охлаждение какого-либо участка дуги компенсируется увеличением количества выделяемой энергии на нем. Для компенсации тепловых потерь из-за охлаждающего действия воды и наличия большого количества водорода на дуге должно быть более высокое (30...35 В).

Сваривают в пресной и соленой воде на постоянном и переменном токе. На постоянном токе дуга горит более устойчиво, чем на переменном, так как постоянный ток разлагает воду еще до

возбуждения дуги, а переменный ток разлагает воду и образует газовый пузырь в момент короткого замыкания.

Для ручной дуговой сварки под водой используют электроды из проволоки Св.08, Св.08А, Св.08Г2С, ППС-АН1. Наибольшее применение получили электроды марок ЭПС-5 и ЭПС-52, имеющие в составе покрытий ферросплавы, улучшающие химический состав и механические свойства металла шва.

Сварка под водой имеет определенные особенности. На больших глубинах необходимы приспособления, защищающие человека от давления воды. Неустойчивое положение и плохая видимость затрудняют работу, а на глубине более 100 м человек вообще теряет работоспособность.

Глава IV. ГАЗОВАЯ СВАРКА И РЕЗКА МЕТАЛЛОВ

§ 1. Применяемые материалы

Важная область сварочного производства — газопламенная обработка, охватывающая такие технологические процессы, как газовая сварка и резка, наплавка и пайка, местная термическая обработка, сварка неметаллических материалов и др. Эти процессы довольно широко применяют в сельскохозяйственном производстве при ремонте. Из способов газопламенной обработки наибольшее применение находят газовая сварка, пайка и кислородная резка.

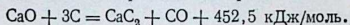
Газовая сварка относится к сварке плавлением, при которой кромки соединяемых кусков металла нагревают газокислородным пламенем. Высокая температура нагрева достигается в результате сгорания горючего газа (ацетилен, водород, бутан, пропан и др., а также пары бензина и керосина) в смеси с технически чистым кислородом.

Кислород, используемый в качестве окислителя, — газ без цвета и запаха. Плотность его при 0°C и давлении 100 кПа равна $1,43 \text{ кг/м}^3$. При охлаждении до $-182,97^{\circ}\text{C}$ и давлении 100 кПа кислород превращается в жидкость голубоватого цвета. Кислород получают из воздуха, сжиженного при глубоком охлаждении, на разделительных установках. Одновременно отделяют аргон

и азот. Кислород можно получить также химическим способом или электролизом воды.

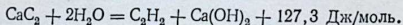
Жидкий кислород перевозят в специальных танках, а затем переливают в газификаторы, которые служат для хранения и выдачи его для потребления в газообразном состоянии. Из 1 м³ жидкого кислорода при испарении образуется 790 м³ газообразного кислорода, который хранят и транспортируют в баллонах. Сжатый газообразный кислород при соприкосновении с маслами, жирами и некоторыми пластмассами мгновенно окисляет их и может привести к воспламенению и взрыву, поэтому категорически запрещается использовать загрязненные этими продуктами оборудование и спецодежду. В случае необходимости оборудование смазывают 5%-ным раствором глицерина в дистиллированной воде.

Карбид кальция (CaC₂) — основное сырье для получения ацетилена. Карбид кальция производят в электрических печах спеканием кокса или антрацита с негашеной известью по эндотермической реакции:



Полученный карбид кальция в виде камнеобразной массы темно-серого цвета размельчают и сортируют на куски размером от 2 до 80 мм. Карбид кальция хранят и транспортируют в герметичных железных барабанах массой 50...130 кг.

Ацетилен (C₂H₂) получают в генераторах при разложении карбида кальция водой. Реакция протекает с выделением значительного количества тепла:



При разложении 1 кг карбида кальция образуется около 285 дм³ ацетилена.

Ацетилен широко применяют в сварочном производстве. При горении в чистом кислороде он дает наиболее высокую температуру пламени (до 3200 °С) и выделяет наибольшее количество тепла (52,6 МДж/м³). Ацетилен — бесцветный газ со специфическим запахом, легче воздуха и кислорода, плотность ацетилена 1,171 кг/м³ при 0 °С и давлении 100 кПа. Воспламеняется ацетилен при температуре 420 °С. Взрывоопасен в смеси с воздухом при содержании 2,2...8,2% и кислородом — 2,3...9,3%, а также при длительном соприкосновении с медью и се-

ребром. Взрывоопасность ацетилена возрастает с увеличением давления. Могут происходить самопроизвольные взрывы при давлении 200...250 кПа при отсутствии кислорода и воздуха. При нагревании ацетилена до 150...180 °С происходит процесс полимеризации, дающий жидкие смолообразные продукты, нежелательные при сварке.

Кроме вышеописанного способа, ацетилен для промышленных целей получают из природного газа, нефти и угля.

В связи с высокой стоимостью и дефицитностью карбида кальция для многих газопламенных процессов применяют более дешевые и менее дефицитные горючие газы и пары горючих жидкостей (табл. 3).

При замене ацетилена оптимальная производительность процесса также будет зависеть от тепловых свойств газового пламени (температура и эффективная мощность), на которые влияет соотношение кислорода и горючих газов в смеси. Под эффективной мощностью понимают количество тепла, вводимое в нагреваемый металл в единицу времени. При правильном выборе эффективной мощности пламени газа-заменителя качество сварки не ухудшается и достигается заметная экономия. Для расчетов замены ацетилена газом-заменителем используют коэффициент φ :

$$\varphi = V_r / V_a,$$

где V_r — расход газа-заменителя, м³/ч; V_a — расход ацетилена, м³/ч.

Присадочный материал, вводимый в сварочную ванну, предназначен для заполнения зазора между кромками свариваемого металла и образования валика шва, который по механическим свойствам должен быть близок к основному металлу. В качестве присадочного материала применяют сварочную проволоку диаметром 0,3...12 мм. ГОСТ 2246—74* включает в себя 6 марок низкоуглеродистой, 30 — легированной, 41 — высоколегированной неомедненной и омедненной проволоки.

Цветные металлы (алюминий, медь, латунь) сваривают проволокой из соответствующего цветного металла или сплава, а бронзы и чугуны — прутками, отлитыми из этих сплавов.

Флюсы при сварке применяют для растворения окислов металлов и образования легкоплавких шлаков с ма-

3. Заменители ацетилена

Газы и пары	Плотность, кг/м ³	Низшая теплотворная способность, МДж/м ³
Газы:		
водород	0,084	10
пропан, бутан	1,867	89
природный	0,7...0,9	34,4...34,7
Пары:		
бензина	0,7...0,76	42...44,5
керосина	0,8...0,84	42...42,8

лой плотностью. Образующиеся при сварке шлаки всплывают на поверхность сварочной ванны, освобождая наплавленный металл от неметаллических включений. Флюсы подбирают в зависимости от химического состава и свойств свариваемого материала.

В качестве флюсов используют буру, борную кислоту, окислы и соли бария, калия, лития, натрия, фтора и др. При сварке чугуна, например, в сварочной ванне образуется кислый окисел SiO_2 , для растворения которого вводят сильные основные окислы K_2O , Na_2O . При сварке меди и латуни образуются основные окислы Cu_2O , ZnO , FeO и др., для растворения которых вводят кислые флюсы, обычно представляющие собой соединения бора. При сварке углеродистых сталей флюсы не применяют, так как сварочное пламя защищает расплавленный металл.

§ 2. Оборудование

Газосварочный пост — рабочее место сварщика, укомплектованное необходимым для выполнения сварочных работ оборудованием: кислородный баллон, кислородный редуктор, ацетиленовый генератор (или ацетиленовый баллон и ацетиленовый редуктор), сварочная горелка (или ацетилено-кислородный резак), рукава (шланги) для кислорода и ацетилена.

Баллоны предназначены для хранения и перевозки кислорода и горючих газов в сжатом или растворенном состоянии (рис. 4.27). Баллон — цельнотянутый стальной цилиндр 3 с выпуклым днищем 1 и полусферической горловиной в верхней части. На нижнюю часть баллона

Температура пламени в рабочей зоне, °С	Соотношение между кислородом и горючим газом в смеси в горелке	Коэффициент замены ацетилена	Пределы взрываемости в смеси, %	
			с воздухом	с кислородом
2100...2500	0,3...0,4	5,2	3,3...81,5	4,6...93
2100	3,5...4,0	0,6	2,17...9,5	—
2200	1,5...1,6	1,8	4,5...14	3...45
2500...2600	1,1...1,4	—	0,7...6,0	2,1...28,4
2400...2500	1,7...2,4	—	1,4...5,5	—

насажен башмак 2, позволяющий ставить баллон вертикально. Горловина 4 имеет конусное отверстие с резьбой, в которое ввернут вентиль 5, регулирующий выход газа из баллона. На внешнюю резьбу горловины навинчивают предохранительный колпак 6. Наибольшее пространство получили баллоны объемом 40 дм³.

Кислородные баллоны при давлении 15 МПа вмещают 6 м³ газа. Их окрашивают в голубой цвет и снабжают надписью черного цвета — «кислород».

Ацетилен хорошо растворяется в ацетоне, это свойство используют для хранения и транспортировки его в баллонах. Баллоны для ацетилена имеют те же размеры, что и баллоны для кислорода, но внутри они заполнены пропитанной ацетоном пористой массой (активированный древесный уголь или смесь угля, пемзы и инфузальной земли). Пористая масса создает систему капилляров и обеспечивает рассредоточение ацетилена по всему объему и локализацию взрывчатого распада ацетилена. Баллон содержит около 5 м³ ацетилена под давлением 1,5...1,6 МПа. Он окрашен в белый цвет и снабжен красной надписью — «ацетилен».

Газовые редукторы служат для снижения давления газа на выходе из баллона и поддержания постоянного рабочего давления. Редукторы бывают с одно- и двухступенчатым редуцированием. Последний обеспечивает меньший перепад давления и более низкий предел редуцирования. Двухступенчатый кислородный редуктор изготавливают в двух вариантах: ДКД-8-65 для сварки и ДКД-15-65 для резки.

Редуктор присоединяют к вентилю баллона накидной гайкой 2 (рис. 4.28). При открытии вентиля газ прохо-

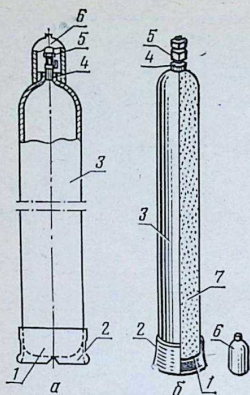


Рис. 4.27. Кислородный (а) и ацетиленовый (б) баллоны:

1 — выпуклое днище; 2 — башмак; 3 — цилиндрический сосуд; 4 — горловина; 5 — запорный вентиль; 6 — предохранительный колпак; 7 — пористая масса.

дит по каналу штуцера, через фильтр 3 попадает в первую ступень редуцирования — камеру А. Давление в камере А контролируют манометром 4. Нажимная пружина 19 рабочей камеры первой ступени редуцирования под действием регулирующего колпачка 20 находится в сжатом состоянии и через диск 21, мембрану 22 и толкатель 18 отжимает клапан от седла. Газ, пройдя из камеры высокого давления А через образовавшийся зазор между клапаном 17 и седлом 16 (под давлением 1,1 МПа в редукторе ДКД-8-65 и 1,2 МПа в редукторе ДКД-15-65), поступает во вторую ступень редуцирования. Давление в рабочей камере В второй ступени редуцирования устанавливают

вращением регулирующего винта 8, а контролируют по манометру 11. При повороте регулирующего винта 8 по часовой стрелке нажимная пружина 7 через диск 6, мембрану 5, толкатель 9 отжимает клапан 14 от седла 10 и газ через образовавшийся зазор поступает в рабочую камеру В, где расширяется до требуемого давления. Под этим давлением газ поступает в горелку или резак. В случае прекращения отбора газа давление в рабочей камере В через мембрану 5 отожмет пружину 7, а запорная пружина 15 прижмет клапан к седлу, прекращая тем самым дальнейший пропуск газа. При этом давление в рабочей камере первой ступени также возрастет и отожмет нажимную пружину 19, а запорная пружина 23 прижмет клапан к седлу.

У ацетиленового редуктора ДАП-1-65 наибольшее давление на выходе — 3 МПа, наибольшее рабочее давление — 0,12 МПа, расход газа при наибольшем рабочем давлении — 5 м³/ч. Наименьшее рабочее давление

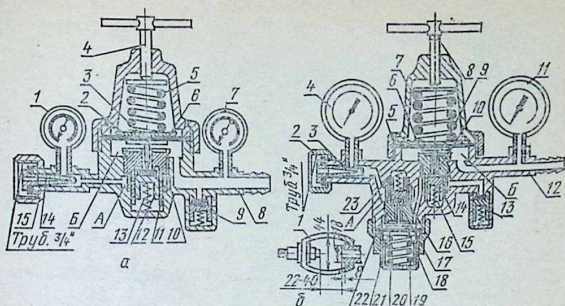


Рис. 4.28. Схемы кислородных редукторов:

а — ДКД-8-65: 1 — манометр; 2 — нажимной диск; 3 — толкатель; 4 — регулировочный винт; 5 — нажимная пружина; 6 — мембрана; 7 — манометр; 8 — ниппель; 9 — предохранительный клапан; 10 — седло клапана; 11 — фильтр; 12 — клапан; 13 — пружина; 14 — фильтр; 15 — накидная гайка; А — камера высокого давления; Б — рабочая камера; Б — ДКД-15-65: 1 — хомут; 2 — накидная гайка; 3 — фильтр; 4 — манометр; 5 — мембрана; 6 — диск нажимной; 7 — пружина; 8 — регулировочный винт; 9 — пружина; 10 — седло клапана; 11 — манометр; 12 — ниппель; 13 — предохранительный клапан; 14 — клапан; 15 — запорная пружина; 16 — седло клапана; 17 — клапан; 18 — толкатель; 19 — нажимная пружина; 20 — регулировочный колпачок; 21 — диск; 22 — мембрана; 23 — запорная пружина; А — камера первой ступени редуцирования; Б — камера второй ступени редуцирования.

составляет 0,001 МПа, расход газа при этом давлении — 3 м³/ч.

Ацетиленовые генераторы — аппараты, в которых получают ацетилен разложением карбида кальция водой. Генератор состоит из газообразователя, газгольдера для сбора и хранения газа, химического очистителя ацетилена от примесей и предохранительного затвора для исключения взрыва.

По характеру взаимодействия карбида кальция с водой различают следующие основные системы ацетиленовых генераторов: «карбид в воду», «вода на карбид», «с вытеснением воды» и «с погружением карбида» (рис. 4.29).

Генераторы системы «карбид в воду» обеспечивают наилучшие условия разложения карбида кальция и дают наибольший выход ацетилена (около 95%). Карбид кальция забрасывают отдельными порциями в большой объем воды. Ацетилен хорошо промывается и охлаждается, что практически исключает его полимеризацию.

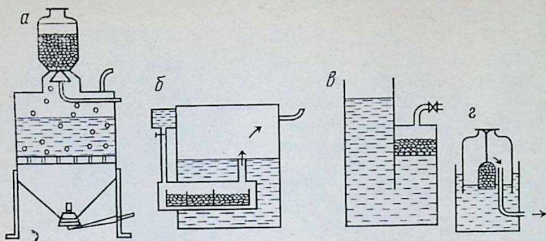


Рис. 4.29. Схемы газогенераторов:

а — «карбид в воду»; б — «вода на карбид»; в — «с вытеснением воды»; г — «с погружением карбида».

Генераторы системы «вода на карбид» имеют периодическую загрузку карбида кальция и дозированную подачу воды в зону реакции. В этих генераторах карбид кальция реагирует с относительно малым количеством воды и в ходе реакции обволакивается слоем гидрата окиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, разъединяющим куски карбида кальция с водой, поэтому реакция разложения не доходит до конца и выход ацетилена снижается до 85...90%. Зона реакции охлаждается недостаточно, поэтому возможны перегрев ацетилена и его полимеризация. Этот тип генераторов наиболее распространен на производстве благодаря простоте конструкции.

В генераторах системы «с вытеснением воды» загрузочное устройство с карбидом кальция неподвижно, а уровень воды периодически изменяется в зависимости от расхода ацетилена. Количество вырабатываемого ацетилена регулируют изменением объема карбида кальция, взаимодействующего с водой. Генераторы этой системы просты по конструкции, но имеют низкий выход ацетилена.

Возможно сочетание в одном генераторе разных систем. В настоящее время широко применяют на монтажных и ремонтных работах при температуре до -25°C генератор АНВ-1,25-68 (рис. 4.30). Это переносной генератор низкого давления, работающий по системе «с вытеснением воды» в сочетании с системой «вода на карбид».

Генератор состоит из корпуса 1 с вваренной в него ретортой 2, в которой помещена загрузочная корзина 3.

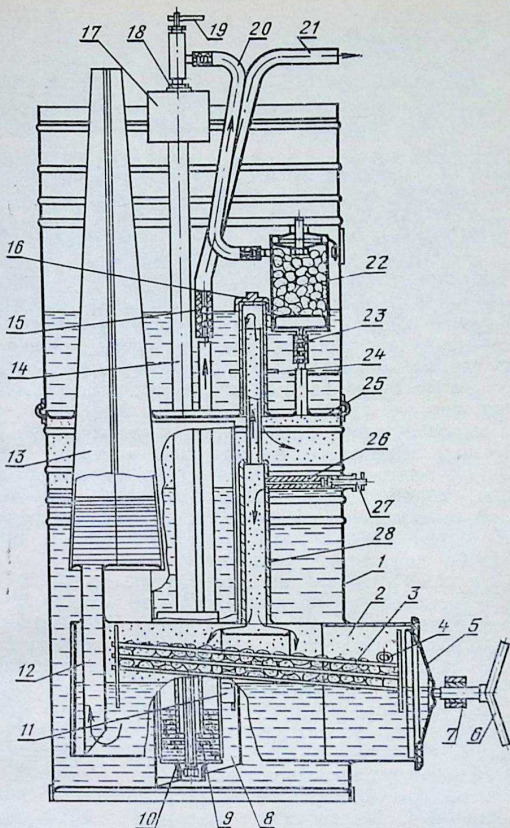


Рис. 4.30. Ацетиленовый генератор АНВ-1,25-68:

1 — корпус; 2 — реторта; 3 — загрузочная корзина; 4 — контрольный кран; 5 — крышка реторты; 6 — рычаг с болтом; 7 — специальная гайка; 8 — циркуляционная труба; 9 — шайба; 10 — резиновая прокладка (кольцо); 11 — контрольный кран; 12 — труба; 13 — камера; 14 — водяной затвор; 15 — ниппель; 16 — пробка; 17 — обечайка; 18 — специальная гайка; 19 — вентиль; 20, 21 и 23 — резиновые шланги; 22 — карбидный сушитель; 24 — водяной уровень; 25 — горизонтальная перегородка; 26 — контрольное отверстие; 27 — вентиль; 28 — газотводящая трубка.

Корпус генератора разделен на нижнюю (газосборник) и верхнюю (водосборник) части горизонтальной перегородкой 25. Эти части соединяет циркуляционная труба 8, доходящая почти до дна газосборника. Между газосборником и водяным затвором 14 помещен карбидный осушитель 22, соединенный с ними резиновыми шлангами 20 и 23.

Генератор заполняют водой через открытую верхнюю часть корпуса до уровня воды 24. Вода в реторту поступает по газоотводящей трубке 28 через отверстие 26 при открывании вентиля 27. Реторта закрывается крышкой 5, рычагом 6 и специальной гайкой 7.

Ацетилен, выделяющийся в результате взаимодействия карбида кальция с водой, поступает по газоотводящей трубке 28 в газосборник и вытесняет находящуюся в нем воду через циркуляционную трубу 8 в верхнюю часть генератора. Вода в реторту поступает до тех пор, пока она не будет вытеснена из газосборника ниже уровня вентиля 27. При этом по мере выделения ацетилена и возрастания давления его в газосборнике и реторте вода вытесняется из реторты 2 в камеру 13 через трубу 12. Благодаря вытеснению воды из реторты дальнейшее газообразование замедляется. При отборе газа давление ацетилена в газосборнике и реторте падает, а вода, вытесненная в камеру, возвращается в реторту и газообразование возобновляется.

При падении давления в генераторе до 2,3...2,7 кПа вода в газосборнике поднимается выше вентиля 27 и начинает пополнять реторту. Поступление воды в реторту прекращается после того, как давление газа превысит 2,7...2,8 кПа, то есть когда уровень воды в газосборнике снова опустится ниже уровня вентиля.

Газ при отборе поступает из газосборника в карбидный осушитель 22, загруженный карбидом, после чего проходит в водяной затвор 14, а из него через ниппель 15 — в горелку или резак.

Генераторы подразделяют по производительности (низкая — до 3, средняя — до 10 и высокая — до 80 м³/ч) и по давлению выработанного ацетилена (низкое — до 0,01, среднее — 0,01...0,15 МПа). Генераторы производительностью до 3 м³/ч изготовляют передвижными, а свыше 3 м³/ч — стационарными.

Ацетилен, полученный в генераторах, содержит вредные примеси (сернистый и фосфористый водород). Аце-

тилен очищают специальной массой (гератоль), состоящей из инфузорной земли, пропитанной раствором двуххромовокислого калия (хромпик) и серной кислоты. Очистительная масса переводит сернистый и фосфористый водород в нелетучие соединения, остающиеся в очистителе.

При работе сварочного поста может произойти взрыв из-за проникновения пламени кислородно-ацетиленовой смеси в генератор (обратный удар). Это явление наблюдают, когда скорость истечения газовой смеси становится меньше, чем скорость ее воспламенения. Обратный удар возникает при неправильной работе с горелкой, перегреве и засорении ее сопла. Для предотвращения взрыва применяют защитные устройства — затворы жидкостные (открытого и закрытого типов) и сухие. Затворы открытого типа устанавливают на ацетиленовых генераторах низкого давления, например ГНВ-1,25. Затворы закрытого безмембранного типа ЗСП-7 применяют на рабочих постах отбора газа из трубопровода при давлении в нем 0,01...0,07 МПа. Сухие затворы типа ЗСМ-1 используют на трубопроводах ацетилена среднего давления.

Водяной затвор действует следующим образом. В затвор, наполненный водой до уровня контрольного крана

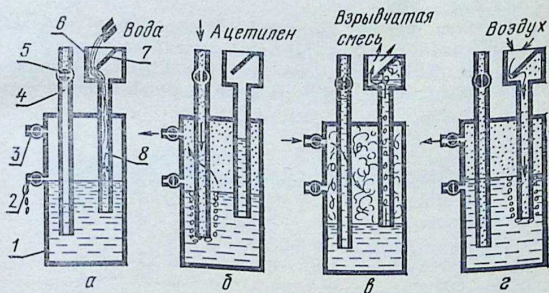


Рис. 4.31. Схема работы водяного предохранительного затвора:

а — заполнение затвора водой; б — нормальная работа затвора; в — момент обратного удара пламени; г — подсос воздуха при недостатке ацетилена; 1 — цилиндрический корпус; 2 — контрольный кран; 3 — газоподводящий кран; 4 — газоподводящая трубка; 5 — кран; 6 — заливная воронка; 7 — отбойник; 8 — предохранительная трубка.

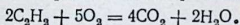
Рукава (шланги) служат для соединения источников газопитания с горелкой или резаком и подвода к ним газов. Их изготавливают из вулканизированной резины с прокладками из ткани или специальной оплетки. Наружный слой шлангов для кислорода синего цвета, для ацетилена — красного, для жидкого топлива — желтого. Неокрашенные шланги из морозостойкой резины применяют при температуре ниже -35°C . Рукава изготавливают трех типов: для подачи ацетилена и другого горючего газа под рабочим давлением не более 0,6 МПа; для подачи бензина и керосина под рабочим давлением не более 0,6 МПа из бензостойкой резины; для подачи кислорода под рабочим давлением 1,5 МПа. Отечественная промышленность выпускает рукава различной длины с внутренним диаметром 6, 9, 12 и 16 мм.

§ 3. Технология сварки и резки

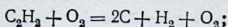
Качественный шов получают при правильном выборе мощности горелки, вида сварного пламени, способа сварки, угла наклона горелки, при применении соответствующего присадочного материала и флюса.

Мощность горелки выбирают в зависимости от толщины и теплопроводности свариваемого металла. Для сварки металла с высокой теплопроводностью нужен наконечник с большим расходом газа.

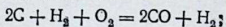
При газовой сварке чаще всего используют ацетилено-кислородное пламя. Полное горение ацетилена в кислороде может быть представлено реакцией:



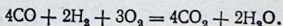
В действительности при горении ацетилена в кислороде протекают сложные промежуточные процессы: распад ацетилена:



первая стадия сгорания ацетилена и окисление углерода за счет кислорода, подаваемого из баллона:



вторая стадия сгорания за счет кислорода из атмосферы:



Сварочное пламя состоит из ядра 1, восстановительной зоны 2 и факела 3 (рис. 4.34). Ядро пламени имеет вид усеченного конуса с округленным концом и обладает характерным ослепительно белым свечением раскаленных частиц углерода, выделившихся при частичном распаде ацетилена. Восстановительная зона имеет наивысшую температуру (до 3150°C на расстоянии 2...6 мм от ядра) за счет окисления частиц углерода в окись углерода кислородом, подаваемым из баллона. Эта зона обладает синеватым свечением. Она состоит из CO и H_2 , которые восстанавливают окислы. В факеле пламени (зона полного сгорания) происходит догорание CO и H_2 за счет атмосферного кислорода. Окраска факела желтоватая.

В зависимости от соотношения кислорода и ацетилена сварочное пламя бывает нормальным, окислительным и науглероживающим. *Нормальное (восстановительное) пламя* имеет четко очерченное ядро, восстановительную зону и факел. Соотношение $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 = 1 : 1,2$. Таким пламенем сваривают большинство черных и цветных металлов. *Окислительное пламя* имеет укороченное заостренное ядро и бледную окраску, а избыток кислорода приводит к окислению металла шва. Соотношение $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 > 1,2$. Это пламя применяют при сварке латуни и пайке твердыми припоями. *Науглероживающее пламя* имеет соотношение $\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 < 1$ (избыток ацетилена). Очертания пламени нечеткие, а его ядро удлинено по сравнению с ядром нормального пламени. Науглероживающее пламя применяют при сварке чугуна и наплавке быстрорежущих сталей и твердых сплавов.

Тепловую мощность сварочного пламени (расход горючих газов в единицу времени) регулируют сменой наконечников горелки. Она зависит от теплофизических

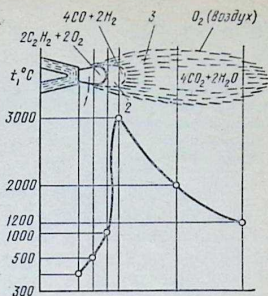


Рис. 4.34. Схема строения нормального ацетилено-кислородного пламени и график распределения температуры по его длине:

1 — ядро пламени; 2 — восстановительная зона; 3 — факел.

свойств и толщины свариваемого металла:

$$A = KS,$$

где A — тепловая мощность сварочного пламени, л/ч; K — коэффициент, учитывающий теплофизические свойства свариваемого металла, л/мм·ч (для стали $K=100\text{...}150$, для чугуна $K=80\text{...}100$, для алюминия $K=75\text{...}100$, для меди $K=200\text{...}250$ л/мм·ч); S — толщина свариваемого металла, мм.

Сварочную горелку сварщик держит в правой руке, а присадочную проволоку — в левой. Сварочное пламя он направляет на металл так, чтобы свариваемые кромки находились в восстановительной зоне, а конец присадочной проволоки — в восстановительной зоне или в сварочной ванне.

Скорость сварки определяется по формуле:

$$v_{\text{св}} = a/S,$$

где $v_{\text{св}}$ — скорость сварки, м/ч; S — толщина свариваемого металла, мм; a — коэффициент, зависящий от свойств свариваемого металла и его толщины, м²/ч.

Скорость и температуру нагрева металла регулируют углом наклона горелки к поверхности свариваемого изделия (максимальные значения при угле 90°). Угол наклона горелки выбирают в зависимости от толщины и рода свариваемого металла. Чем толще металл и выше его теплопроводность, тем больше должен быть этот угол.

Толщина, мм	До 1	1...3	3...5	5...7	7...10	10...12	12...15	15	Более
Угол наклона, град		10	20	30	40	50	60	70	80

Газовую сварку ведут правым и левым способами. При толщине металла до 3 мм применяют левую сварку (рис. 4.35, а), при которой горелку перемещают справа налево. Присадочный пруток 1 располагают слева от горелки 2 и передвигают впереди пламени. Это не препятствует наблюдению за формированием шва. Движения горелки и прутка встречно пересекающиеся зигзагообразные.

При правом способе (рис. 4.35, б) горелку перемещают слева направо, что позволяет полнее использовать тепло пламени, лучше защитить сварочную ванну, за-

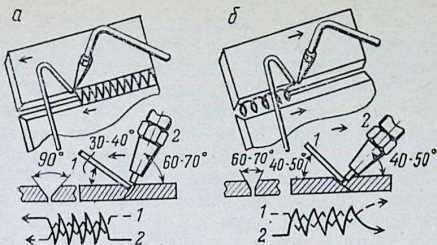


Рис. 4.35. Левая (а) и правая (б) газовая сварка:

1 — присадочный пруток; 2 — горелка.

медлить охлаждение металла шва и получить шов более высокого качества. Движения горелки и присадочного прутка зигзагообразные или движение горелки прямолинейное, а прутка — спиральное. Этот способ применяют при сварке металла толщиной более 5 мм.

Диаметр сварочной проволоки d определяют в зависимости от толщины свариваемого металла по следующим формулам:

$$\text{для правого способа } d = S/2;$$

$$\text{для левого способа } d = S/2 + 1.$$

Газовая резка основана на сжигании металла струей кислорода с выделением значительного количества тепла и удалении этой струей образующихся окислов. Процесс резки начинают с нагрева металла подогревающим пламенем до температуры воспламенения в кислороде, после чего пускают струю режущего кислорода.

Газовой резке могут подвергаться металлы, у которых температура плавления выше температуры воспламенения в кислороде, температура плавления окислов, образующихся при резке, ниже температуры плавления металла и максимальной температуры резки. Тепловыделение при образовании окислов металла должно быть достаточно для прогрева глубинных слоев, так как подогревающее пламя резака выделяет не более 30% тепла, необходимого для резки. Низкая теплопроводность металла должна обеспечивать быстрый и концентрированный нагрев.

Перечисленными свойствами обладают низкоуглеродистые стали, содержащие до 0,25% углерода. Они хорошо режутся. Среднеуглеродистые стали (0,25...0,5% углерода) режутся удовлетворительно при сопутствующем или предварительном подогреве, что исключает закалку кромок и образование трещин. Резка сталей затрудняется с повышением в них содержания углерода и легирующих элементов. Высокохромистые и хромоникелевые стали, чугуны, медные и алюминиевые сплавы обычной кислородной резке не поддаются. Высокохромистые и хромоникелевые стали образуют тугоплавкие и густотекущие шлаки, затрудняющие доступ кислорода к обрабатываемой поверхности. Температура воспламенения чугуна выше, чем температура его плавления. У цветных сплавов высокая теплопроводность и образуются тугоплавкие окислы. Такие сплавы режут кислородно-флюсовым способом, при котором в струю режущего кислорода подают порошкообразный флюс. Сгорание флюса способствует выделению дополнительного тепла, температура в зоне реакции повышается, и тугоплавкие окислы разжижаются. В качестве флюсов применяют железные (ПЖ1...ПЖ6) и алюминиевые (АПВ) порошки.

Глава V. ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

§ 1. Свариваемость металлов

Последние разработки ученых в области сварки позволяют соединять чрезвычайно разнообразные материалы, но возможности сварки не безграничны. Физические и химические свойства некоторых очень нужных для промышленности сплавов таковы, что любые способы сварки дают трещины, зоны высокой хрупкости, поры. Свойства сплавов зависят от количества легирующих элементов, но даже самые лучшие из них нельзя вводить неограниченно. Наука о сварке в настоящее время может предсказать, какие сплавы будут хорошо свариваться, а какие — плохо. Возьмем, к примеру, сталь.

Содержание углерода, марганца и еще ряда элемен-

тов в различной степени влияет на свариваемость сталей, поэтому их воздействие сравнивают с влиянием углерода (приводят к эквиваленту углерода). Исследованиями установлено, что отрицательное воздействие хрома и молибдена приблизительно в 5 раз меньше влияния углерода, марганца — в 6 раз, кремния — в 24 раза, ванадия — в 14 раз. Чтобы знать, сколько в низко- и среднелегированную сталь можно ввести легирующих элементов, существует формула эквивалента углерода:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{10} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14}.$$

Для определения эквивалента углерода в эту формулу вместо символов подставляют процентное содержание элементов. Надежное соединение толстолистовой стали (без специальных приемов) можно получить при условии, что эквивалент углерода в металле шва не будет превышать 0,47%. Если же расчетное эквивалентное содержание углерода будет выше, то для исключения образования трещин следует применить предварительный подогрев. Иногда в состав шва вводят элементы, снижающие склонность к трещинообразованию (например, титан).

Формула эквивалента углерода выведена опытным путем и не всегда отражает точную картину взаимодействия различных элементов в сварочной ванне, поэтому при определении свариваемости обычно сваривают специальные образцы, а затем подвергают их исследованию. Свариваемость многих сплавов давно известна. Хорошо свариваются малоуглеродистые стали и технически чистый алюминий. Пониженной свариваемостью обладают многие чугуны, большинство медно-цинковых сплавов. Особую сложность представляет сварка разнородных металлов, отличающихся один от другого по свойствам. Да и сварка однородных, даже чистых металлов, обладающих хорошей свариваемостью, имеет свои особенности, которые необходимо учитывать.

§ 2. Сварка чугуна

Все группы чугунов характеризуются пониженной свариваемостью. Наиболее широко применяют хорошо разработанную сварку деталей из серых чугунов.

Плохая свариваемость чугуна выражается в повышенном образовании трещин, что обусловлено его низкой прочностью и пластичностью; в образовании при сварке в металле шва и в околошовной зоне при повышенных скоростях охлаждения хрупких структур в результате отбеливания. Такая структура (ледебурит) ухудшает обрабатываемость чугуна. Трещины в металле шва и в основном металле, главным образом в зоне термического влияния, могут возникнуть от неравномерного нагрева и охлаждения.

Чтобы избежать перечисленных явлений, применяют **горячую сварку**, при которой свариваемые детали предварительно подогревают до 400...600 °С в нагревательных печах в горнах. Перед сваркой в деталях вырубают дефектные места и разделяют кромки, которые затем заформовывают с помощью графитных пластин и кварцевого песка, замешенного на жидком стекле.

Сварку ведут чугунами электродами диаметром 8...25 мм со стабилизирующей или специальной обмазкой. Ток выбирают из расчета 50...90 А на 1 мм диаметра электрода. Сваренные детали охлаждают вместе с печью. При горячей сварке чугуна получают соединение без твердых отбеленных и закаленных участков. Однако горячая сварка — дорогой и трудоемкий процесс. Его применяют для ремонта ответственных деталей.

Весьма распространенный метод сварки серого чугуна — **холодная сварка электрической дугой**. При этом в качестве электродов применяют чугунные или стальные стержни со специальной обмазкой, стержни из сплавов меди с никелем и др. Так как при холодной сварке температура изделия не превышает 30...40 °С, процесс сварки необходимо вести коротким швом. Для более медленного охлаждения шов покрывают листовым асбестом или детали зарывают в песок.

Чтобы избежать повышения твердости металла в месте сварки, применяют комбинированные электроды, например стальные электроды диаметром 3...5 мм с тонкой обмазкой, вставленные в медную трубку.

Хорошие результаты получены при **диффузионной сварке** чугуна с чугуном и чугуна со сталью на стандартном оборудовании и при обычной технологии.

Газовую сварку чугуна ведут как с общим, так и с местным нагревом с получением наплавленного металла, имеющего структуру серого чугуна. В качестве горю-

чего газа используют ацетилен, пропан, бутан и другие газы, а в качестве присадочного материала можно использовать чугунные прутки марок А и Б.

Дефекты, вскрывшиеся в отливках на последних стадиях механической обработки, сваркой плавлением исправить нельзя, так как высокий нагрев основного металла приводит к необратимому «росту» чугуна и к значительным деформациям изделия. В этом случае дефекты устраняют пайкосваркой без расплавления основного металла, а соединение получают за счет более легкоплавкого металла припоя. Вместе с этим применяют пайкосварку чугунными припоями, при которой соединение образуется за счет поверхностно-активных флюсов и особых технологических приемов, позволяющих нагревать основной металл до температуры ниже температуры плавления припоя. Аналогично осуществляют низкотемпературную пайкосварку латунными припоями.

§ 3. Сварка меди и ее сплавов

Медь благодаря исключительной электро- и теплопроводности играет большую роль в различных отраслях промышленности. Из нее делают многие детали сварочных установок, работающих в сложных температурных условиях (сопла горелок, водоохлаждаемые кристаллизаторы, ползуны, ограничивающие шлаковую ванну).

В принципе медь обладает хорошей свариваемостью, которую несколько снижают ее легкая окисляемость в расплавленном состоянии и образование закиси меди. Эта закись сосредоточивается по границам кристаллов, в результате чего образуются трещины; наблюдается пониженная стойкость против возникновения пор из-за выделений водяного пара при кристаллизации; высокая теплопроводность и жидкотекучесть. В настоящее время для изготовления медных изделий применяют как способы дуговой сварки (угольными электродами, ручную покрытыми электродами), так и новые способы (под флюсами, в защитных газах, плазменный). В качестве защитных газов, кроме инертных, применяют азот и даже водород. Металл толщиной более 4 мм обычно сваривают с подогревом.

Труднее сваривать сплав меди с цинком (латунь). Для того чтобы предотвратить испарение легкоплавких

составляющих, особенно цинка, разработаны специальные технологические приемы. В результате испарения цинка латунный шов теряет свои свойства и возможно возникновение пор. Пары цинка ядовиты, и для защиты от них надо применять специальные маски (респираторы).

Для уменьшения испарения цинка газовую сварку латуни производят с применением газового флюса. При этом в пламя горелки вместе с ацетиленом подают пары боросодержащих жидкостей. Борный ангидрид, образующийся на поверхности сварочной ванны, связывает окислы цинка и образует сплошной слой шлака, который препятствует выходу паров цинка из сварочной ванны. Возможна также газовая сварка латуни окислительным пламенем, что приводит к появлению тугоплавкой пленки окиси цинка на поверхности сварочной ванны, препятствующей испарению цинка. Сварку ведут так, чтобы не разрушить эту пленку. Во всех случаях ядро пламени удерживают на удалении от сварочной ванны и направляют на присадочный пруток. Сварку ведут с большой скоростью.

При сварке угольным электродом в качестве присадочного материала применяют кремнистые и марганцовистые бронзы или латунь с повышенным содержанием цинка. Дугу зажигают и поддерживают не на основном металле, а на конце присадочного прутка. Сварку металлическими электродами со специальными покрытиями производят очень короткой дугой без колебаний конца электрода.

Латунь можно успешно сваривать контактной сваркой, поскольку электро- и теплопроводность латуни приблизительно такие же, как и у малоуглеродистой стали.

Большинство бронз — это литейные материалы, и сварка их применяется только для заварки дефектов и ремонта. Наиболее широко применяют дуговую сварку металлическим электродом. Электрод для сварки бронз представляет собой стержень (близкий по составу основному металлу) с нанесенным на него специальным покрытием.

§ 4. Сварка алюминия и его сплавов

Алюминий широко применяют во многих областях техники, кое-где он вытеснил сталь, чугун, медь. Но получить качественное сварное соединение из

алюминия очень сложно из-за особенностей его физических и химических свойств. Несмотря на сравнительно низкую температуру плавления (660°C), алюминий обладает высокой теплопроводностью, теплоемкостью и большой скрытой теплотой плавления, поэтому для создания сварочной ванны необходимо значительное количество тепла.

На поверхности алюминия при контакте с воздухом (или другой кислородсодержащей фазой) мгновенно образуется прочная окисная пленка, которая хорошо защищает металл от коррозии. Чтобы расплавить эту пленку, необходима очень высокая температура. В принципе нетрудно получить такую высокую температуру, но с повышением температуры толщина окисной пленки резко возрастает, что препятствует сплавлению кромок. Оставшиеся в ванне окислы ухудшают прочность и герметичность соединения.

Наиболее эффективные средства для удаления окисной пленки — электрический ток и химическое взаимодействие с элементами из группы галогенов. В природе известно много соединений, содержащих галогены; но для использования в качестве сварочного флюса они должны обладать особыми свойствами, в том числе и невысокой температурой плавления ($600\text{--}700^{\circ}\text{C}$). Этим требованиям удовлетворяют галогенные соли щелочных и щелочноземельных металлов (NaF , NaCl , KCl , Na_2AlF_6), которые и послужили основой для флюсов и электродных покрытий.

Сварка по флюсу обладает многими положительными качествами и нашла широкое применение в промышленности. Однако этот способ нельзя применять при сварке в различных пространственных положениях, а коррозионная стойкость шва снижается из-за остатков флюсов на его поверхности. Это привело к разработке способов сварки в инертных газах плавящимся и неплавящимся электродами. При этом изделие подключают к отрицательному полюсу источника питания или дугу питают переменным током. Окисная пленка в зоне сварки подвергается катодному распылению.

Сплавы алюминия с магнием и цинком сваривают теми же способами, что и алюминий. Исключение составляют дюралевые сплавы, представляющие собой сплавы алюминия и меди. Эти сплавы термически упрочняют закалкой и последующим старением, в результате чего

значительно повышаются их прочность и твердость. Нагрев свыше 500 °С приводит к сплавлению и окислению границ зерен, и происходит резкое снижение механических свойств. Свойства перегретого дюралевого сплава не могут быть восстановлены никакой термической обработкой. Таким образом, сварка дюралей связана с разупрочнением зоны термического влияния на 40...50%. При сварке их в атмосфере защитного газа также происходит снижение прочности, однако термообработкой можно восстановить прочность до 80...90% прочности основного металла.

Алюминий и некоторые его сплавы удовлетворительно сваривают **контактной сваркой**. При этом необходимы большая мощность и плотность тока при очень быстром его протекании. Хорошо сваривается алюминий **диффузионной сваркой**.

§ 5. Сварка легированных сталей

При сварке легированных сталей происходят выгорание легирующих элементов, выделение карбидов; при нагреве наблюдается самозакаливаемость наплавленного металла и металла переходной зоны; возникают усадочные напряжения и очень часто образуются трещины вследствие малой теплопроводности легированных сталей.

Склонность к горячим трещинам сварных швов легированных конструкционных сталей определяется следующими факторами: химическим составом металла шва; растягивающими напряжениями; размерами первичных кристаллов; формой сварочной ванны (шва), от которой зависят направление роста столбчатых кристаллов, характер их срастания, степень зональной ликвации и расположение осей кристаллов относительно направления растягивающих напряжений.

Для предупреждения образования трещин рекомендуют подогревать изделия до 100...300 °С, заменять однослойную сварку многослойной (при этом сварку вести валиками небольшого сечения по неостывшим нижним слоям металла); применять для сварки электроды с покрытием основного типа, прокаленные перед сваркой при 400...450 °С в течение нескольких часов; сварку вести на постоянном токе обратной полярности; произво-

дить отпуск изделий непосредственно после сварки до температуры 300 °С и выше.

Трудности сварки высокохромистых сталей связаны с тем, что в процессе охлаждения в области высоких температур (около 1000 °С) возможно выпадение карбидов хрома на границах зерен (особенно для ферритных сталей). Для предупреждения этого необходимо: производить сварку при малых погонных энергиях, то есть применять пониженные значения тока и накладывать валики малого сечения с целью обеспечения большой скорости охлаждения; вводить в сталь и наплавленный металл сильные карбидообразователи (Ti, Cr, Zr, V), способные связать углерод в карбиды; производить отжиг после сварки при 900 °С для выравнивания содержания хрома в зернах и на их границах.

При сварке феррито-мартенситных и мартенситных сталей основные трудности заключены в закалке шва и околошовной зоны и образовании холодных трещин. Для предупреждения образования трещин эти стали сваривают с подогревом до 200...300 °С.

Для получения коррозионностойких сварных соединений при сварке аустенитных хромоникелевых сталей необходимо применять следующие меры: вести сварку при малых погонных энергиях с теплоотводящими медными подкладками и водяным охлаждением; вводить в шов карбидообразующие элементы и снижать содержание углерода; производить закалку после сварки (температура закалки 1100 °С).

Для уменьшения образования горячих трещин необходимо: применять специальную аустенитную сварочную проволоку (Св.Х25Н15Г7ВЗ, Св.Х25Н15Г7Ф), основные электродные покрытия и флюсы; вести сварку на небольших токах и при пониженном напряжении, чтобы получать широкие и выпуклые (но не вогнутые) сварные швы; в отдельных случаях полезно применять подогрев до 300...400 °С. Аустенитные хромоникелевые стали хорошо свариваются контактной сваркой.

Диффузионная сварка позволяет сваривать жаропрочные сплавы на никелевой основе, аустенитные хромоникелевые сплавы при температурах значительно ниже температуры плавления. В этом случае отсутствуют процесс первичной рекристаллизации металла и опасность возникновения горячих трещин.

Сварку марганцовистой стали выполняют электродами того же химического состава, что и химический состав основного металла, или электродами из марганцовистой стали со специальным покрытием. Это предотвращает выделение карбидов из аустенита, которое влечет за собой снижение пластичности металла и возможность образования горячих трещин.

§ 6. Напряжения и деформации при сварке

При сварке металлов возникают значительные температурные напряжения, а после охлаждения изделий сохраняются остаточные напряжения.

Напряжения и деформации при сварке вызывают неравномерный нагрев изделий, усадку наплавленного металла при кристаллизации и охлаждении, структурные изменения в зоне термического влияния и сварном шве. Последний фактор нередко сопровождается изменением объема. Особенно чувствительны к изменению объема стали, склонные к закалке (легированные и среднеуглеродистые), так как образование мартенсита сопровождается увеличением объема металла. Эти напряжения могут концентрироваться в отдельных участках, суммироваться и приводить к образованию трещин. Деформации и напряжения зависят от вида сварки, формы и размера изделий, от размера зоны нагрева.

Борьбу с напряжениями, возникающими при сварке, ведут предварительным подогревом изделий перед сваркой, замедленным охлаждением, отжигом сварных изделий при 550...650 °С, легкой проковкой швов и т. д.

Для избежания деформаций металла изделий при сварке применяют следующие меры: обратноступенчатый порядок нанесения швов, при котором длинный шов делят на участки длиной 150...200 мм; деформирование деталей перед сваркой в направлении, обратном деформированию при сварке; увеличение отвода тепла от свариваемого изделия; жесткое крепление свариваемых элементов в специальных приспособлениях.

§ 7. Дефекты сварных соединений

К основным дефектам сварных соединений относят следующие.

Непровар — дефект в виде местного несплавления в сварном соединении из-за неполного расплавления кро-

мок или поверхностей ранее выполненных валиков. Причинами непровара могут быть неправильное ведение сварки, загрязнение поверхности металла, недостаточный ток и др.

Подрез зоны сплавления — дефект в виде углубления на основном металле вдоль линии сплавления сварного шва с основным металлом, образующийся из-за неправильного подбора режима сварки.

Трещина сварного соединения — дефект в виде разрыва в сварном шве и прилегающих к нему зонах. Различают трещины продольные (параллельные продольной оси сварного шва), поперечные (перпендикулярные продольной оси сварного шва), разветвленные (имеют ответвления в различных направлениях), микротрещины (видны при увеличении не менее чем в 50 раз) и сетку трещин.

Трещины — наиболее опасный дефект сварных соединений. Они могут привести к разрушению конструкций при нормальных или пониженных нагрузках. Склонность сварных швов к образованию трещин зависит от неравномерного нагрева и охлаждения металла, химического состава металла, режима сварки, последовательности наложения швов и т. п.

Поры сварного шва — дефект в виде полости округлой формы, заполненной газом. Поры могут быть поверхностными, внутренними или располагаться в линию (цепочка пор сварного шва). Газовые пузыри возникают в результате перенасыщения жидкого металла газами, появление которых вызвано наличием влаги во флюсе, ржавчиной на поверхности разделки кромок изделий и другими причинами.

Неметаллические включения сварного шва — дефект в виде макро- и микроскопических частиц соединений металла с кислородом (оксиды), азотом (нитриды), серой (сульфиды), фосфором (фосфиды).

Различают эндогенные включения, которые образуются в результате протекания в металле различных процессов (например, химических реакций), и экзогенные включения, возникающие при попадании инородных частиц. В сварном шве бывают шлаковые, окисные и металлические (в виде частиц инородного металла) включения.

Перегрев и пережог металла — местное окисление металла в зоне сварки из-за наличия сильноокислитель-

ной среды, применения большой силы тока или мощности газовой горелки при медленном перемещении электрода и газовой горелки вдоль шва.

Прожог — сквозное проплавление свариваемых изделий из-за применения большой силы тока для данной толщины металла или большого зазора.

К дефектам сварных швов также относятся *брызги металла* (дефект в виде затвердевших капель металла на поверхности сварного соединения), *поверхностное окисление сварного соединения* (дефект в виде окалины, пленки окислов или цветов побежалости), *наплав на сварном соединении* (дефект в виде натекания металла шва на поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним), *занижение размеров сечения и неполное сопряжение сварного шва, смещение сварных кромок*.

Контроль качества сварных соединений и конструкций осуществляют разрушающими и неразрушающими методами.

К разрушающим методам относят механические испытания, технологические пробы, металлографические исследования, химический анализ, коррозионные испытания, испытания на свариваемость.

К неразрушающим методам относят внешний осмотр, испытание керосином, гидравлический, пневматический, магнитодефектоскопический, магнитографический, рентгено- и гамма-дефектоскопический и ультразвуковой методы.

Глава I. ОСНОВЫ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

§ 1. Фазы в металлических сплавах

Металлический сплав — соединение двух и более элементов, отличающееся металлическими свойствами. Химические элементы или их соединения, образующие сплав, принято называть *компонентами*. Сплав может состоять из двух и более компонентов и образовывать одну или несколько фаз.

Фаза — однородная часть неоднородной системы, отделенная от других частей поверхностью раздела. Металлические сплавы, находящиеся в жидком состоянии, как правило, представляют одну фазу (однородны). После затвердевания, в зависимости от природы компонентов, сплавы могут состоять из одной, двух и более твердых фаз. В твердом состоянии компоненты сплава могут химически взаимодействовать, образуя структуру химического соединения, или взаимно диффундировать, образуя твердые растворы, могут образовывать механическую смесь из прочно сцепленных зерен.

Твердый раствор образуется при проникновении атомов растворимого элемента в кристаллическую решетку растворителя. Растворителем называют тот металл, кристаллическая решетка которого сохраняется как основа. Твердые растворы — это однофазные системы, которые образуются при условии, что компонентом-растворителем является чистый металл или химическое соединение.

Различают растворы замещения, внедрения и вычитания. Твердый раствор замещения образуется при замещении части атомов основного металла (растворитель) атомами растворенного (рис. 5.1). Твердые растворы замещения образуются при сплавлении большинства металлов (например, железа с хромом, марганцем, никелем, вольфрамом, молибденом, меди с цинком, оловом, алюминием и т. п.). Эти растворы бывают ограниченной и неограниченной растворимости компонентов.

Твердые растворы внедрения образуются при размещении атомов растворенного элемента между узлами

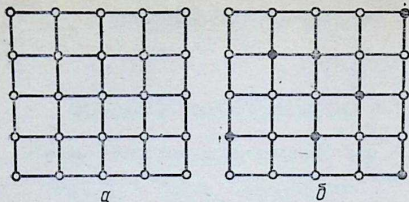


Рис. 5.1. Схема кристаллического строения основного металла (а) и твердого раствора замещения (б). Светлые кружки — основной металл, темные — растворенный.

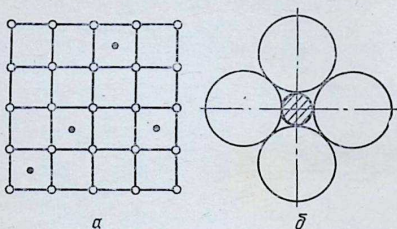


Рис. 5.2. Схема кристаллического строения твердого раствора внедрения:

a — атомы растворенного элемента (черные кружки) внедряются между узлами кристаллической решетки основного металла; *б* — наибольшая для кубической решетки (ГЦК) октаэдрическая дырка (отверстие между атомами).

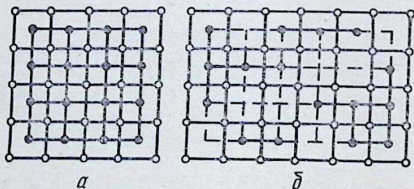


Рис. 5.3. Схема кристаллического строения: *a* — химического соединения; *б* — твердого раствора вычитания.

кристаллической решетки растворителя (рис. 5.2). Такие растворы образуются при взаимодействии металлов с неметаллическими элементами малых атомных размеров. На рисунке 5.2, б видно, что размер внедренных атомов должен быть намного меньше основных. Примером этого типа твердых растворов являются растворы углерода в α -железе (феррит) и γ -железе (аустенит).

Твердые растворы вычитания образуются на основе некоторых химических соединений. В этом их основное отличие от твердых растворов замещения и внедрения, которые образуются на основе чистых металлов. На рисунке 5.3 показана кристаллическая структура химического соединения NiAl и твердый раствор Al в NiAl. Избыточные атомы Al не замещают атомы никеля, а подстраиваются к простой кристаллической решетке, образованной атомами алюминия (белые кружки на рис. 5.3, б). Вместе с этим появляются свободные узлы, где отсутствуют атомы никеля. Твердые растворы вычитания имеют большое практическое значение. Используют их при производстве твердых сплавов, например растворы Ti в TiC, V в VC и др.

Твердые растворы (независимо от типа) обычно обозначают греческими буквами α , β , γ , δ и т. д. в порядке увеличения в них концентрации растворимого элемента.

Химическое соединение образуется, когда атомы различных элементов сплава притягиваются между собой и между ними имеется электрохимическое различие. Химические соединения характеризуются строго определенным количественным соотношением компонентов сплава и кристаллической решеткой, отличной от решеток входящих в состав компонентов. Химические соединения образуются между металлами (FeC₃ и др.), а также между металлами и неметаллами (карбиды, нитриды, оксиды и др.) и обладают высокой твердостью, хрупкостью и повышенным электросопротивлением. Некоторые из них (карбиды, нитриды, оксиды, фосфиды и др.) получили довольно широкое самостоятельное применение.

Механическая смесь образуется, когда атомы различных элементов отталкиваются или притягиваются слабее, чем подобные атомы. При этом атомы стремятся обособиться в отдельные кристаллические зерна, связанные между собой только общими границами. Механические смеси могут состоять из чистых компонентов,

твердых растворов, химических соединений и т. д. В кристаллах, образующих механическую смесь, сохраняется кристаллическая решетка входящих в ее состав компонентов. Механические смеси образуются как при одновременном выпадении из жидкого раствора при его охлаждении кристаллов составляющих его компонентов (эвтектическая смесь), так и в результате превращений раствора в твердом состоянии (эвтектоидная смесь).

§ 2. Правило фаз Гиббса

Для теоретической проверки результатов исследований различных чистых металлов и их сплавов, для обоснования построенных опытным путем кривых охлаждения и диаграмм состояния сплавов пользуются правилом фаз Гиббса. Этот закон устанавливает количественную зависимость между числом степеней свободы, числом фаз и числом компонентов:

$$C = K + P - \Phi,$$

где C — число степеней свободы; K — число компонентов; P — число внешних факторов равновесия; Φ — число фаз.

Системой называют совокупность фаз в твердом, жидком и газообразном состояниях, которые можно задавать произвольно без разрушения системы. Система может быть простой или сложной, однородной или неоднородной.

Компонентом называют только независимую составную часть системы, которая может быть или химическим элементом, или независимым химическим соединением.

Фазой называют однородную часть системы, отделенную от других частей (фаз) поверхностью раздела. Фазами могут быть компоненты, химические соединения, твердые и жидкие растворы, пары.

Числом степеней свободы (вариантность системы) называют число возможных вариантов изменения температуры, давления и концентрации фаз без изменения числа фаз в системе.

Для металлических сплавов, находящихся под постоянным давлением, переменными внешними факторами являются температура и концентрация. В этом случае правило фаз принимает вид:

$$C = K + 1 - \Phi.$$

§ 3. Основные типы диаграмм состояния сплавов

Диаграммы состояния сплавов характеризуют графическую зависимость между фазовым составом, температурой и концентрацией составляющих систему компонентов. Эти диаграммы позволяют определить температуры начала и конца затвердевания сплавов, их структуру для различных температур и превращения, которые имеют место в сплавах при охлаждении и нагревании.

Диаграммы состояния сплавов строят на основании данных экспериментальных исследований, полученных методами термического, микроскопического, рентгеноструктурного, магнитного и других анализов. Основным, наиболее простым и широко используемым является метод термического анализа. При термическом анализе определяют температуру начала и конца затвердевания сплавов при переходе их из жидкого состояния в твердое, а также температуру всех превращений (критические температуры), происходящих в сплавах в твердом состоянии. Для термического анализа готовят ряд сплавов с различной концентрацией одного из компонентов. Эти сплавы подвергают исследованию, то есть нагревают до расплавления, а затем медленно и равномерно охлаждают. Через определенные промежутки времени отмечают температуру сплава. На основании полученных данных строят кривую охлаждения для каждого сплава в координатах температура — время. Полученные на кривых охлаждения характерные (критические) точки переносят в координаты температура — концентрация. Затем, соединив между собой точки начала и конца кристаллизации, получают диаграмму состояния, построенную в общих чертах (рис. 5.4).

Первый тип диаграмм состояния. Для случая отсутствия взаимной растворимости компонентов в твердом состоянии. Характерной особенностью данного типа диаграмм является то, что компоненты неограниченно растворимы в жидком состоянии и образуют механическую смесь своих кристаллов. По диаграмме состояния этого типа кристаллизуются системы Pb—Sb; Sn—Zn; Pb—Ag и др. Для примера возьмем диаграмму состояния сплавов системы Pb—Sb (рис. 5.4).

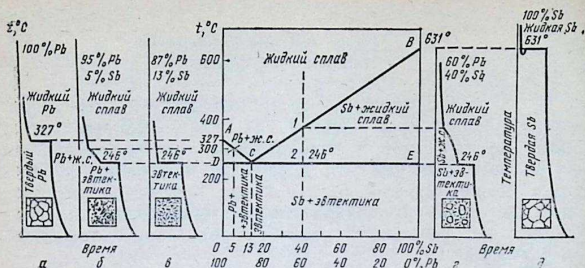


Рис. 5.4. Диаграмма состояния сплавов свинца с сурьмой и кривые охлаждения:

а — чистого свинца; б — сплава, содержащего 5% сурьмы и 95% свинца; в — сплава, содержащего 13% сурьмы и 87% свинца; г — сплава, содержащего 60% свинца и 40% сурьмы; д — чистой сурьмы.

Выше линий *AC* и *CB* сплавы всех составов находятся в жидком состоянии. На этих линиях начинается кристаллизация сплавов. Вот почему линию *ACB* называют линией *ликвидус* (жидкий). Линия *DCE* соответствует концу затвердевания сплавов. Ниже этой линии сплавы всех составов находятся в твердом состоянии, поэтому линию *DCE* называют *солидус* (твердый).

Между линиями ликвидус и солидус сплавы состоят из двух фаз: жидкой и твердой. В области, ограниченной фигурой *DAC*, сплавы находятся в виде кристаллов свинца и жидкого сплава, а в области, ограниченной фигурой *CBE*, — в виде кристаллов сурьмы и жидкого сплава. Ниже линии *DCE* (солидус) все сплавы находятся в твердом состоянии, но фазовый состав их различный. Ниже линии *DC* они состоят из кристаллов свинца и эвтектики, ниже точки *C* — из одной эвтектики, ниже линии *CE* — из кристаллов сурьмы и эвтектики.

Следовательно, все сплавы системы *Pb—Sb* можно подразделить на три группы по структуре и составу. Сплав, содержащий 13% *Sb*, — эвтектический, сплавы с концентрацией до 13% *Sb* — доэвтектические, сплавы с концентрацией более 13% *Sb* — заэвтектические (рис. I. Здесь и далее римскими цифрами обозначены рисунки, помещенные на вклейке.).

Применяя правило фаз Гиббса к системе *Pb—Sb*, можно провести теоретическое исследование всех пре-

вращений, имеющих место при охлаждении или нагревании сплавов различной концентрации. Для этого следует провести на диаграмме вертикаль, соответствующую любому составу сплава, и по точкам пересечения ее с линиями диаграммы определить то или иное превращение (начало или конец затвердевания или плавления).

К примеру возьмем сплав, содержащий 60% Pb и 40% Sb, и проведем вертикаль. Выше точки 1 сплав находится в жидком состоянии; следовательно, фаза одна (жидкий сплав). Здесь система двухвариантна ($C = 2 + 1 - 1 = 2$), так что можно менять и температуру, и концентрацию сплава (в определенных пределах), не изменяя его равновесия (сплав будет оставаться жидким). В точке 1, лежащей на линии *CB*, начинают выделяться кристаллы сурьмы. В этой точке и внутри всего треугольника *CBE* сплавы состоят из кристаллов сурьмы и жидкого сплава. Здесь система одновариантна ($C = 2 + 1 - 2 = 1$), что позволяет произвольно менять либо температуру, либо концентрацию, не изменяя равновесия сплава.

В точке 2, лежащей на линии *CE*, сплав окончательно затвердевает и получается структура, состоящая из кристаллов сурьмы и эвтектики. Следовательно, здесь имеются три фазы: сурьма, жидкий сплав и свинец, входящий в состав эвтектики. Система в точке 2 безвариантна ($C = 2 + 1 - 3 = 0$), и любое изменение температуры или концентрации вызовет нарушение равновесия. Такое состояние наблюдается по всей линии *DCE*, ниже которой все сплавы находятся в твердом состоянии. Такие превращения имеют место во всех заэвтектических сплавах.

В доэвтектических сплавах на линии *AC* из жидкого сплава начинают выпадать кристаллы свинца, так как он обладает более высокой температурой затвердевания, чем остающийся жидкий раствор, который с понижением температуры обогащается сурьмой. Выделение кристаллов свинца наблюдается до линии *DC*. На этой линии оставшаяся часть жидкой фазы (концентрация сурьмы 13%) затвердевает с образованием эвтектики.

Второй тип диаграмм состояния. Для случая полной растворимости компонентов одного в другом в твердом состоянии. По этому типу диаграмм затвердевают сплавы Cu—Ni; Co—Ni; Fe—Ni и др. В качестве примера на

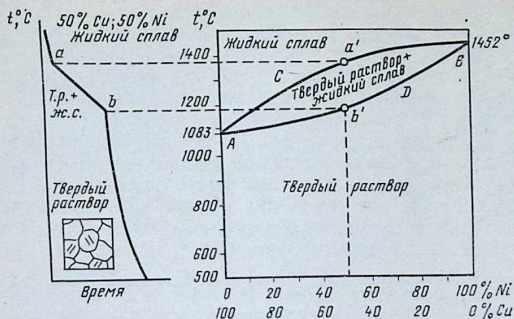


Рис. 5.5. Диаграмма состояния сплавов меди с никелем.

рисунке 5.5 приведена диаграмма состояния сплавов системы Cu—Ni.

В отличие от системы Pb—Sb затвердевание сплавов Cu—Ni начинается с выделения из жидкого раствора кристаллов твердого раствора меди и никеля. Эти сплавы затвердевают в некотором интервале температур и имеют на кривых охлаждения две критические точки (два перегиба). Между перегибами из жидкого сплава выпадают кристаллы твердого раствора.

Верхняя линия *ACB* диаграммы соответствует началу кристаллизации сплавов, а нижняя *ADB* — концу кристаллизации. Таким образом, выше линии ликвидус сплавы находятся в жидком состоянии (одна фаза), внутри фигуры *ACBD* система состоит из кристаллов твердого раствора и жидкого сплава (две фазы), ниже линии солидус — из одного твердого раствора (одна фаза).

Применив правило фаз для исследования диаграммы данного типа, можно, аналогично предыдущему случаю, проследить за всеми превращениями при охлаждении и нагревании сплавов системы Cu—Ni.

Третий тип диаграмм состояния. Для случая ограниченной взаимной растворимости компонентов в твердом состоянии. Примером может служить система Cu—Ag (рис. 5.6).

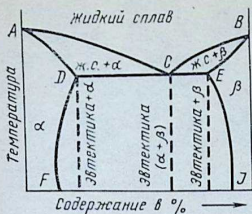


Рис. 5.6. Диаграмма состояния сплавов с ограниченной взаимной растворимостью компонентов в твердом состоянии.

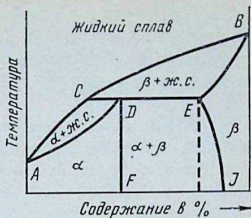


Рис. 5.7. Диаграмма состояния сплавов с перитектическим превращением.

Линия ACB — ликвидус, $ADEB$ — солидус, DCE — линия эвтектического превращения, α — твердый раствор Ag в Cu , β — твердый раствор Cu в Ag .

Выше линии ACB все сплавы системы находятся в жидком состоянии. Области ниже линий AD и EB соответствуют твердым растворам α и β , где превращение протекает по схеме второго типа диаграмм состояния. В интервале концентраций от точки D до точки E затвердевание происходит согласно диаграмме первого типа с той лишь разницей, что эвтектика будет состоять не из кристаллов меди и серебра, а из твердых растворов α и β .

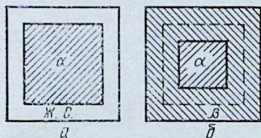


Рис. 5.8. Схема образования перитектики:

a — кристалл твердого раствора окружен жидким расплавом; $б$ — кристалл твердого раствора окружен кристаллами другого твердого раствора.

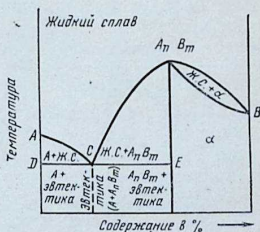


Рис. 5.9. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых образуют химическое соединение.

Четвертый тип диаграмм состояния. Для случая образования перитектики. Перитектическое превращение встречается при образовании $\alpha(\delta)$ -железа, а также в сплавах меди с цинком, оловом, алюминием и др. (рис. 5.7).

Образование перитектики происходит по следующей схеме. Выпавшие из жидкости кристаллы β -твердого раствора и оставшаяся жидкость в определенной концентрации и в определенном количестве реагируют между собой, образуя кристаллы другого α -твердого раствора.

Механизм образования перитектики двух типов. По линии CD при взаимодействии β -твердого раствора с жидким сплавом образовавшийся α -твердый раствор оказывается окруженным жидким сплавом, который остается в избытке от перитектической реакции (рис. 5.8, а). По линии DE в результате взаимодействия избыточным является β -твердый раствор и α -твердый раствор оказывается в его окружении (рис. 5.8, б). Перитектика (как и эвтектика) представляет собой механическую смесь, однако несколько по-другому построенную.

На диаграмме линия ACB — ликвидус, $ADEB$ — солидус, CDE — линия перитектического превращения. Левее точки C и правее точки E превращение протекает по принципу второго типа диаграмм состояния.

Пятый тип диаграмм состояния. Для случая образования между компонентами химического соединения, которое можно рассматривать как самостоятельный компонент, образующий порознь с компонентами A и B два типа простейших диаграмм состояния (рис. 5.9). Химическое соединение, подобно чистому металлу или твердому раствору, будет иметь однофазную структуру.

На диаграмме линия ACA_nB_mB — ликвидус, $DCEA_nB_mB$ — солидус. В левой части диаграммы превращения протекают согласно диаграмме первого типа с той разницей, что на линии CE образуется эвтектика из кристаллов компонента A и химического соединения A_nB_m . В правой части превращения протекают по схеме второго типа диаграмм состояния.

Твердость, электрические и другие физические характеристики сплавов, затвердевающих согласно диаграмме состояния первого типа, изменяются по закону прямой линии (рис. 5.10, а). Если в сплавах образуется не-

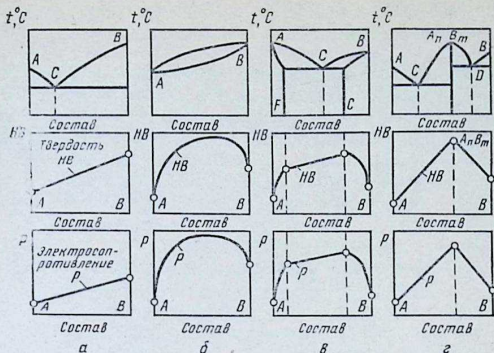


Рис. 5.10. Зависимость между диаграммами состояния сплавов и их свойствами:

а — для первого типа диаграмм; б — для второго типа; в — для третьего типа; г — для пятого типа.

прерывный ряд твердых растворов, то свойства изменяются по криволинейной зависимости (рис. 5.10, б). В системе сплавов с ограниченной растворимостью компонентов и в случае образования химического соединения свойства изменяются в соответствии с принадлежностью той или иной части диаграммы к первому или второму типу (рис. 5.10, в и г).

Глава II. ЖЕЛЕЗО И ЕГО СПЛАВЫ

§ 1. Свойства железа и углерода

Железо — металл серебристого цвета с температурой плавления 1539°C . Чистое железо, получаемое в настоящее время, содержит $0,001\%$ примесей, а технические сорта железа содержат $0,1...0,2\%$ (С, Мп, Si, S, P и др.). Весьма важным свойством железа является аллотропия. Установлено, что железо имеет две модификации (α и γ), отличающиеся строением и свойствами. α -железо существует при температурах ниже 911°C и выше 1401°C . Для интервала температур $1401...$

1539 °С α -железо обозначают δ -железо. Модификация γ -железо существует в интервале температур 911...1401 °С.

Механические свойства железа зависят от чистоты и размера зерен. Твердость железа по Бриннелю составляет 580...800, предел прочности при растяжении $\sigma_B = 180...280$ Н/см², удлинение $\delta = 30...50\%$, сужение $\Psi = 70...80\%$. Железо легко образует сплавы со многими элементами (С, Si, Mn, Cr, Ni и др.). Плотность железа равна 7,68 т/м³, коэффициент линейного расширения — $11,7 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹.

Углерод — неметаллический элемент с плотностью 2,5 т/м³ и температурой плавления 3500 °С. Углерод имеет три аллотропические формы (уголь, графит и алмаз). В железоуглеродистых сплавах углерод присутствует (где он является вторым компонентом) или в виде графита, или в виде цементита Fe₃C (химическое соединение железа с углеродом).

Графит имеет незначительную прочность и слабо выраженные металлические свойства. В сплавах с железом он теряет свой металлический характер. Углерод растворяется в железе в жидком и твердом состояниях и образует α - и γ -твердые растворы внедрения с ограниченной растворимостью.

§ 2. Фазы и структурные составляющие в железоуглеродистых сплавах

В системе Fe—C (Fe—Fe₃C) различают следующие фазы: жидкий сплав, твердые растворы (феррит и аустенит), химическое соединение — цементит, а также графит. Структурными составляющими могут быть феррит, аустенит, цементит, перлит, ледебурит и графит.

Феррит — твердый раствор внедрения углерода и других элементов в α -железе. Различают низкотемпературный α -феррит с растворимостью углерода в пределах 0,006% при нормальной температуре, 0,025% при 727 °С и высокотемпературный δ -феррит с предельной растворимостью углерода 0,1%. Феррит имеет кристаллическую решетку ОЦК, в центре которой расположен атом углерода. Температура 768 °С является точкой Кюри для феррита, то есть ниже этой температуры феррит магнитен, а выше — немагнитен. Феррит имеет пример-

но следующие механические свойства: $\sigma_b = 25 \text{ Н/см}^2$; $\delta = 50\%$; $\Psi = 80\%$; НВ 800...900. Под микроскопом феррит виден в виде светлых (полиэдрических) зерен (рис. II, а).

Аустенит — твердый раствор внедрения углерода и других элементов в γ -железе. В зависимости от температуры в γ -железе может раствориться от 0,8% (при 727°C) до 2,14% С (при 1147°C). Аустенит имеет кристаллическую решетку ГЦК, атомы углерода в которой расположены в центре граней куба. Твердость аустенита составляет до НВ220, он немагнитен. Микроструктура аустенита — полиэдрические зерна, характеризующиеся в отличие от феррита двойниками (рис. II, б).

Цементит — химическое соединение железа с углеродом (карбид железа Fe_3C). Углерода в цементите содержится 6,67%. Цементит имеет твердость до НВ1000, хрупок, непластичен. Под микроскопом виден в форме блестящих включений (при травлении 2...5%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте). У цементита сложная ромбическая кристаллическая решетка с плотной упаковкой атомов. Карбид железа в стали и чугуна является метастабильной фазой. В условиях равновесия в сплавах с высоким содержанием углерода образуется графит.

Цементит в системе $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ можно подразделить на пять видов: первичный, вторичный, третичный, эвтектоидный, эвтектический. Такое деление является условным, однако оно дает предпосылки к пониманию строения сплавов. Кристаллы первичного цементита выделяются непосредственно из жидкого раствора. Вторичный цементит выделяется из аустенита в результате уменьшения содержания углерода с понижением температуры. Третичный цементит выделяется из феррита. Эвтектоидный цементит является структурной составляющей перлита, а эвтектический — ледебурита.

Перлит — механическая смесь, состоящая из цементита в ферритной основе — образуется в результате распада аустенита при 727°C. Содержание углерода в перлите составляет 0,8%. В зависимости от формы цементита перлит бывает пластинчатый (рис. II, в) и зернистый (рис. II, г). Перлит является эвтектоидом. Эвтектоидом называют характерную равномерную пластинчатую или зернистую микросмесь, подобную эвтектике, но в отличие от нее образующуюся не из жидкого сплава, а при превращении твердого раствора.

Механические свойства перлита зависят от формы и дисперсности (измельченность) частичек цементита. У пластинчатого перлита прочность несколько выше, чем у зернистого, а относительное удлинение ниже.

Ледебурит представляет собой эвтектику, состоящую из цементита и аустенита, предельно насыщенного углеродом в момент образования. Он образуется при затвердевании из жидкого расплава при 1147°C . При дальнейшем охлаждении аустенит превращается в перлит; следовательно, при нормальной температуре он состоит из перлита и цементита (рис. II, *д*). Ледебурит отличается высокой твердостью (HB700) и хрупкостью.

Графит — одна из кристаллических разновидностей углерода, имеющая гексагональную решетку. Плотность графита $2,2 \text{ т/м}^3$. Графит присутствует в структуре чугунов и графитизированных сталей. Форма его может быть пластинчатой, хлопьевидной или шаровидной. Наиболее благоприятна и желательна последняя форма.

§ 3. Диаграмма состояния железо — цементит

Диаграмма состояния железо — цементит (железо — углерод) показывает фазовый состав и структуру сплавов железа с углеродом (концентрация углерода от 0 до 6,67%) при различных температурах (рис. 5.11. См. форзац).

Рассмотрим сначала основные точки и линии диаграммы. Процесс кристаллизации сплавов начинается при температурах, соответствующих линии *ABCD* (линия ликвидус). Конец затвердевания соответствует температурам, образующим линию солидус *АНIECF*.

На диаграмме железо — цементит есть три горизонтальные линии, на которых протекают неинвариантные реакции. Линия *НIV* носит название линии перитектического превращения. При 1499°C протекает перитектическая реакция, в результате которой образуется аустенит. Эту реакцию наблюдают только у сплавов, содержащих от 0,1 до 0,5% углерода.

Линия *ECF* носит название линии эвтектического превращения. При 1147°C протекает эвтектическая реакция, в результате которой образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита, называемая ледебуритом.

Такое превращение наблюдают у всех сплавов системы, содержащих более 2,14% углерода.

Линию *PSK* называют линией эвтектоидного превращения. При 727°C происходит эвтектоидная реакция, в результате которой образуется эвтектоидная смесь феррита с цементитом, называемая перлитом. Эвтектоидное превращение наблюдают у всех сплавов с концентрацией углерода более 0,02% (практически все промышленные сплавы).

По линии *SE* можно проследить изменение растворимости углерода в γ -железе (аустенит) в зависимости от температуры. Взяв любую точку на диаграмме правее концентрации углерода 0,8%, спроектировав ее на линию *SE*, а затем опустив перпендикуляр на ось концентраций, получим количество углерода, растворенного в аустените. Аналогично можно использовать линию *PQ*, которая дает возможность определить концентрацию углерода в феррите практически во всех сплавах.

4. Точки диаграммы железо — цементит

Обозначения точки	A	B	H	J	N	E	C
Температура, °C	1539	1499	1499	1499	1392	1147	1147
Концентрация углерода, %	0	0,5	0,1	0,16	0	2,14	4,3

Продолжение

Обозначения точки	F	D	G	P	S	K	Q	L
Температура, °C	1147	1250	911	727	727	727	600	600
Концентрация углерода, %	6,67	6,67	0	0,02	0,8	6,67	0,01	6,67

Значения координат точек на диаграмме железо — цементит согласно новейшим данным приведены в таблице 4. Обозначение точек диаграммы является общепринятым в международной практике.

Теперь рассмотрим диаграмму. Вследствие сложности диаграммы железо — цементит ее удобнее разбить по частям. Однако ничего принципиально нового

сказано не будет, так как излагаемые дальше объяснения — это применение к диаграмме железо — цементит сведений, полученных при рассмотрении простейших типов диаграмм состояния.

Рассмотрим превращения, происходящие в произвольном сплаве концентрации K_1 , содержащем менее 0,1% углерода (рис. 5.12. См. форзац). При охлаждении ниже точки 1 из жидкого сплава начинают выпадать кристаллы δ -феррита. Кристаллизация жидкости в δ -феррит заканчивается в точке 2. В области AHN находится только δ -феррит. До точки 3 в сплаве никаких превращений нет. В точке 3 начинается превращение δ -феррита в аустенит. В области NHI устойчивы одновременно δ -феррит и аустенит. В точке 4 превращение заканчивается, и ниже линии NI имеется только аустенит.

Охлаждение сплава, содержащего 0,16% углерода, протекает вначале так же, как и предыдущего сплава (выделяется δ -феррит с переменной концентрацией). В точке 1 при 1499°C жидкость принимает концентрацию B , а δ -феррит — концентрацию H и начинает образовываться аустенит с концентрации I . Применяя правило фаз ($C = K + 1 - F = 2 + 1 - 3 = 0$), получаем, что в наличии имеется три фазы и, следовательно, превращение протекает при постоянной температуре (линия $6-6'$ на кривой охлаждения).

При содержании углерода меньше или больше 0,16% после окончания перитектической реакции остается в избытке δ -феррит или жидкость, которая при дальнейшем охлаждении превращается в аустенит.

Сплавы, содержащие от 0,16 до 2,14% углерода, кристаллизуются в интервале температур, ограниченном линиями BC и IE . После затвердевания (ниже линии IE) в сплавах образуется однофазная структура — аустенит (рис. 5.11).

Рассмотрим теперь процессы первичной кристаллизации в сплавах, содержащих более 2,14% углерода (рис. 5.13. См. форзац). Сплав с концентрацией углерода 4,3% при 1147°C полностью превращается в эвтектику (ледебурит), состоящую из аустенита и цементита. Доэвтектические сплавы, содержащие от 2,14 до 4,3% углерода, начинают кристаллизацию с образованием кристаллов аустенита. Сплав концентрации K_1 начинает затвердевать в точке 1. При температуре, соответствующей

точке *a*, сплав состоит из кристаллов аустенита и жидкости. Согласно правилу отрезков, доля жидкости равна отношению отрезков $ac : bc$, а доля аустенита — $ab : bc$. Химический состав кристаллов аустенита и жидкости определяется соответственно проекциями точек *c* и *b* на ось концентраций. Когда температура снижается до точки 2 (1147°C), аустенит содержит 2,14% углерода (точка *E* на диаграмме), а жидкость — 4,3% (точка *C* на диаграмме). Вся оставшаяся жидкость превращается при постоянной температуре в эвтектику. Ниже линии *EC* доэвтектические сплавы состоят из аустенита и ледебурита.

Заэвтектические сплавы (сплав K_2) начинают кристаллизацию с выпадения кристаллов первичного цемента при температурах, соответствующих линии *CD*. По мере кристаллизации из жидкости выпадает все больше первичного цемента. Концентрация углерода в нем 6,67% — больше среднего значения содержания углерода в сплаве, поэтому в жидком сплаве содержание углерода будет уменьшаться. При температуре, соответствующей точке *d*, состав жидкого сплава определяется проекцией точки *e* на ось концентраций. Когда температура снижается до точки 5, состав жидкости опять соответствует эвтектике (4,3% углерода). При этой температуре вся оставшаяся жидкость превращается в эвтектику. Ниже линии *CF* заэвтектические сплавы состоят из первичного цемента и ледебурита.

Все сплавы, содержащие менее 2,14% углерода, в результате первичной кристаллизации имеют структуру аустенита, а сплавы, содержащие более 2,14% углерода, — структуру ледебурита с избыточным аустенитом или цементом.

Железоуглеродистые сплавы делят на две группы по содержанию углерода. Сплавы, содержащие до 2,14% углерода, называют сталями, а более 2,14% — чугунами.

Рассмотрим превращения аустенита в сталях при охлаждении (рис. 5.14. См. форзац). Сплав, содержащий 0,8% углерода, сохраняет структуру аустенита неизменной до 727°C. При медленном охлаждении в точке *S* происходит превращение аустенита в механическую смесь, состоящую из пластинок феррита и цемента, называемую перлитом (рис. III, б). Образование однородной механической смеси из твердого раствора при постоянной температуре принято называть эвтектоидным

превращением, а получающуюся при этом структуру — эвтектоидом.

Стали, содержащие менее 0,8% углерода, называют доэвтектоидными, больше чем 0,8% — заэвтектоидными и с 0,8% углерода — эвтектоидными.

В доэвтектоидных сталях превращение аустенита начинается с образованием феррита (рис. 5.14). Сталь концентрации K_1 при температуре соответствующей точке 2 начинает превращаться в феррит, который почти не содержит углерода.

При температуре в точке b растворимость углерода в феррите определяет точка a . Оставшийся аустенит насыщается углеродом. В точке 3 содержание углерода (0,8%) в оставшихся кристаллах аустенита определяет точка S . Этот аустенит превращается в перлит. В области GPS присутствуют аустенит и феррит, а ниже линии PS — феррит с перлитом (рис. III, a).

Малоуглеродистые стали при охлаждении ниже линии PG приобретают структуру феррита.

Как уже отмечалось, линия PQ на диаграмме — граница растворимости углерода в α -железе. В области правее точки Q из феррита выпадает третичный цементит, который располагается по границам зерен и сильно снижает ударную вязкость малоуглеродистых сталей. В сплавах, расположенных левее точки Q , третичный цементит не выпадает.

Вторичная кристаллизация заэвтектоидных сталей начинается с выпадением вторичного цементита. В сплаве концентрации K_2 выпадение вторичного цементита начинается в точке 5 и заканчивается в точке 6. Вторичный цементит располагается по границам зерен аустенита.

На линии SK аустенит превращается в перлит. Ниже этой линии структура заэвтектоидных сталей состоит из перлитных зерен, по границам которых расположен вторичный цементит в виде сетки (рис. III, b).

Используя правило отрезков для сплава концентрации K_1 , можно определить соотношение фаз и их концентрацию. В точке D концентрация феррита определяется проекцией точки a , а аустенита — точки c . Доли этих фаз определяются отношением соответствующих отрезков.

При достижении сплавом точки 3 состав аустенита примет эвтектоидную концентрацию, и при постоянной

температуре будет происходить превращение аустенита в перлит (горизонтальный участок 3—3' на кривой охлаждения). После окончания превращения структура стали будет состоять из феррита и перлита.

Теперь рассмотрим превращения, происходящие при охлаждении чугунов. Чугун эвтектической концентрации (4,3% углерода) при 1147°C превращается из жидкого сплава в эвтектику (ледебурит), которая состоит из аустенита и цементита. В интервале температур 1147... 727°C ледебурит не изменяет своего строения, если не принимать во внимание, что содержание углерода в аустените уменьшается с 2,14 до 0,8%. При 727°C аустенит ледебурита превращается в перлит. Следовательно, ниже 727°C ледебурит будет состоять из перлита и цементита.

Доэвтектический чугун (до 4,3% углерода) в момент перехода в твердое состояние состоит из аустенита и ледебурита. Содержание углерода в аустените около 2,14%. При понижении температуры растворимость углерода в аустените уменьшается и при 727°C составляет 0,8%. Выделяющийся из аустенита углерод соединяется с железом и образует вторичный цементит. При 727°C аустенит превращается в перлит, и при нормальной температуре структура доэвтектического чугуна состоит из перлита (черные участки на рис. II, д), вторичного цементита (светлые участки) и ледебурита (мелкие черные пятнышки на светлом поле).

В заэвтектических чугунах происходят превращения, аналогичные превращениям в доэвтектических чугунах, так как первичный цементит не имеет превращений. Структура заэвтектического чугуна состоит из ледебурита и цементита.

Несмотря на видимую сложность структурных форм, особенно у высокоуглеродистых сплавов, следует указать, что все области диаграммы являются однофазными или двухфазными. Лишь на линиях *HIB* (перитектическое превращение), *ECF* (эвтектическое превращение) и *PSK* (эвтектоидное превращение) в равновесии находятся три фазы. В области *SEFK* имеются две фазы — аустенит и цементит, а в области *PKLQ* — феррит и цементит, образующие различные структурные составляющие, как указано на диаграмме состояния железа — цементит.

§ 1. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали

В углеродистой стали, кроме углерода, всегда присутствуют кремний, марганец, сера, фосфор, азот, кислород, водород, которые попадают в сталь при ее выплавке. Их называют постоянными примесями, которые оказывают различное влияние на свойства стали. Постоянные примеси делят на полезные (марганец, кремний) и вредные (сера, фосфор, азот, кислород, водород).

Углерод является основной примесью. В зависимости от его содержания сильно меняются механические свойства стали. Твердость (НВ), предел прочности при растяжении (σ_b) и предел упругости ($\sigma_{0,2}$) растут с повышением содержания углерода до 1%, а относительное удлинение (δ), относительное сужение (Ψ) и ударная вязкость (a_n) уменьшаются (рис. 5.15).

Содержание углерода влияет на технологические свойства стали. С увеличением его содержания улучшается обработка резанием, повышаются закаливаемость, чувствительность к перегреву, свариваемость ухудшается.

Сера — вредная примесь, которая не растворяется в железе. Она образует с ним химическое соединение FeS (сернистое железо), которое, в свою очередь, образует с железом эвтектику с температурой плавления 985... 988 °С. При затвердевании стали эвтектика располагается в виде легкоплавкой оболочки вокруг зерен. Наличие эвтектики является причиной красноломкости (хрупкости при красном калении) стали с повышенным содержанием серы при горячей обработке (ковка, прокатка и др.). При нагреве перед обработкой давлением эвтектика плавится, в результате чего между зернами теряется связь и возникают трещины. Сера снижает пластичность и прочность стали, сопротивление истиранию и коррозионную стойкость, но усиливает ликвацию. Содержание серы в стали не должно быть более 0,05%.

Фосфор вызывает хладноломкость (хрупкость при нормальной температуре). Он ухудшает пластичность и вязкость. Фосфор растворяется в феррите и повышает прочность стали. При содержании фосфора более 0,1%

хладноломкость стали резко растет. Фосфор имеет большую склонность к ликвации при кристаллизации стали. Это приводит к образованию отдельных участков, богатых фосфором, при общем содержании его в стали менее 0,1%. Высококачественные стали должны содержать не более 0,03% фосфора.

Марганец вводят в сталь для раскисления, то есть для устранения вредных примесей закиси железа. Марганец нейтрализует вредное действие серы, растворяется в феррите и цементите. Марганец заметно

влияет на свойства стали, повышая прочность и изменяя некоторые другие свойства. Но так как во всех сталях содержание марганца примерно одинаково, то его влияние на сталь разного химического состава остается примерно постоянным. Марганца в стали не должно быть более 0,8%.

Кремний при обычном содержании (не более 0,5%), так же как и марганец, повышает прочность стали. Он раскисляет сталь. Кремний структурно не обнаруживается, так как он полностью растворяется в феррите.

Азот, кислород и водород присутствуют в стали в небольших количествах в газообразном состоянии, находясь в твердом растворе, образуют различные неметаллические соединения (нитриды, оксиды). Так как содержание указанных примесей невелико (водорода — 0,0003...0,0007; азота — 0,004...0,006; кислорода — 0,005...0,008%), то их влияние на многие свойства незаметно. Однако они сильно уменьшают ударную вязкость и резко повышают порог хладноломкости.

§ 2. Классификация и маркировка углеродистых сталей

Стали классифицируют по способу производства, химическому составу, способу раскисления, назначению, качеству и структуре.

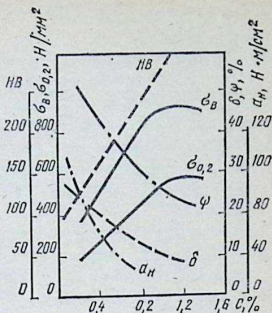


Рис. 5.15. Влияние углерода на механические свойства стали.

По способу производства различают мартеновскую, кислородно-конверторную, бессемеровскую, томассовскую и электросталь.

По условиям и степени раскисления различают спокойные, кипящие и полуспокойные стали. Спокойные стали получают полным раскислением металла в печи, а затем в ковше. Кипящие стали полностью не раскислены. Полуспокойные стали представляют собой стали промежуточного типа. Они получают все большее применение.

По химическому составу углеродистые стали делят на малоуглеродистые (до 0,3% углерода), среднеуглеродистые (0,3...0,6% углерода) и высокоуглеродистые (более 0,6% углерода).

По назначению углеродистые стали делят на конструкционные и инструментальные. Конструкционные, в свою очередь, подразделяют на строительные (до 0,3% углерода) и машиностроительные (до 0,5% углерода). Инструментальные стали изготавливают для режущего, измерительного и штампового инструмента.

По качеству стали делят на обыкновенного качества ($S \leq 0,06\%$; $P \leq 0,04\%$), качественные ($S \leq 0,04\%$; $P \leq 0,04\%$) и стали повышенного качества ($S \leq 0,03\%$; $P \leq 0,03\%$).

По структуре в отожженном состоянии углеродистые стали подразделяют на доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные.

В СССР приняты стандарты на углеродистую сталь, которые устанавливают маркировку, химический состав, способ производства и раскисления, механические свойства и правила приемки. Предусмотрено два типа углеродистых сталей: обыкновенного качества и качественные.

Из углеродистых сталей обыкновенного качества изготавливают горячекатаный прокат (балки, прутки, швеллеры, уголки, листы, трубы), поковки, строительные конструкции, арматуру и малоответственные детали машин.

В зависимости от назначения и гарантируемых характеристик сталь обыкновенного качества подразделяют на три группы:

- А — с гарантированными механическими свойствами;
- Б — с гарантированным химическим составом;

В — с гарантированными механическими свойствами и химическим составом.

В эти группы входят следующие марки сталей:

А — Ст.0, Ст.1, Ст.2, Ст.3, Ст.4, Ст.5, Ст.6;

Б — БСт.0, БСт.1, БСт.2, БСт.3, БСт.4, БСт.5, БСт.6;

В — ВСт.2, ВСт.3, ВСт.4, ВСт.5.

Сталь всех групп с номерами 1, 2, 3 и 4 по степени раскисления изготовляют кипящей, полуспокойной и спокойной; с номерами 5 и 6 — полуспокойной и спокойной.

Полуспокойную сталь с номерами марок 3 и 5 производят с обычным и повышенным содержанием марганца. Стали марок Ст.0 и БСт.0 по степени раскисления не разделяют. Обозначение марок стали буквенно-цифровое, где буквы Ст. обозначают «сталь», цифры от 0 до 6 — условный номер марки в зависимости от химического состава и механических свойств. Буквы Б и В обозначают группы стали. Букву А в обозначении марки стали не указывают. Для обозначения степени раскисления после номера добавляют индексы: кп — кипящая, пс — полуспокойная, сп — спокойная сталь (например, Ст.3пс, БСт.3сп, ВСт.3сп). Для обозначения полуспокойной стали с повышенным содержанием марганца после номера ставят букву Г (например, Ст.3Гпс, БСт.3Гпс, ВСт.5Гпс).

Вместе с буквенно-цифровым обозначением стали маркируют несмываемой краской, при этом независимо от группы и степени раскисления используют следующие цвета: Ст.0 — красный и зеленый; Ст.1 — белый и черный; Ст.2 — желтый; Ст.3 — красный; Ст.4 — черный; Ст.5 — зеленый; Ст.6 — синий.

Углеродистую качественную сталь, выплавляемую в мартеновских и электропечах, изготовляют спокойной, кипящей и полуспокойной только с нормальным содержанием марганца. Цифры в маркировке стали (05, 08, 10...20, 25...85) показывают среднее содержание углерода в сотых долях процента.

Качественная углеродистая сталь превосходит сталь обыкновенного качества по однородности, она более чистая по сере и фосфору, неметаллическим включениям и имеет более узкие пределы содержания углерода.

Низкоуглеродистые стали (05...25) не подвергают термической обработке, а используют для цементации. Они хорошо свариваются и штампуются. Среднеугле-

тической линии $E'C'F'$ — эвтектический графит, по линии $S'E'$ — вторичный графит и по линии $P'S'K'$ — эвтектоидный графит.

Если при кристаллизации графит не успевает выделяться и образуется цементит, то графитизация может происходить в твердом состоянии через аустенит. При этом наблюдают несколько микропроцессов, накладывающихся один на другой: распад цементита и растворение атомов углерода в аустените; образование центров графитизации в аустените; диффузия атомов углерода в аустените к центрам графитизации; рост кристаллов (включения) графита.

Для выделения графита необходима определенная и притом малая скорость охлаждения. При этом чем ниже температура, тем медленнее должно быть охлаждение, чтобы выделялся не цементит, а графит. Особенно медленным должно быть охлаждение, чтобы аустенит при эвтектоидном распаде также выделял графит.

Чтобы кристаллизация шла по стабильной системе $Fe-C$ и при всех температурах выделялся графит, охлаждение должно соответствовать линии $M-N$ (рис. 5.17). Во всех случаях, когда кривая охлаждения чугуна идет левее линии $N-N$ (кривая V_1), свободный углерод не успевает выделяться и чугун полностью кристаллизуется по системе $Fe-Fe_3C$ (образуется белый чугун). Если кривая охлаждения чугуна идет правее линии $N-N$ (кривая V_2), весь углерод выделяется в свободном состоянии, чугун полностью кристаллизуется по системе $Fe-C$ и имеет структуру, состоящую из феррита и графита (получается феррито-графитовый серый чугун). Если же кривые охлаждения чугунов пересекают линию $N-N$ (кривые V_3 и V_4), то в точках пересечения T_n и T'_n происходит переход кристаллизации на метастабильную систему (начинается выделение цементита).

§ 2. Белый чугун

Белый чугун кристаллизуется согласно диаграмме состояния системы железо — цементит. Белый чугун из-за присутствия в нем довольно большого количества цементита обладает высокой твердостью, хрупкостью и практически не поддается обработке резанием. Свое название этот чугун получил по виду излома, кото-

рый имеет матово-белый цвет. Белый чугун применяют весьма ограниченно.

Нередко на практике используют отбеленный чугун. Отбеленными называют чугунные отливки, в которых поверхностные слои имеют структуру белого чугуна, а сердцевина — серого. Между этими зонами может быть переходный слой. Отбел на некоторую глубину (12...30 мм) происходит при быстром охлаждении поверхности, возникающем в результате отливки чугуна в металлические формы. Высокая твердость поверхности (HB400...500) обуславливает хорошую сопротивляемость против износа, особенно абразивного, поэтому из отбеленного чугуна изготавливают валки листовых прокатных станов, колеса, шары для мельниц и т. д.

§ 3. Серый чугун

Серый чугун на изломе имеет темно-серый цвет вследствие того, что весь углерод или его часть выделена в виде графита пластинчатой формы. В зависимости от степени распада цементита различают ферритный, феррито-перлитный и перлитный чугун. Структура серого чугуна подобна структуре стали, но в ней присутствует графит.

Серый ферритный чугун получают при полном распаде цементита структурно свободного и также структурно связанного в ледебурите и перлите. Структура чугуна состоит из феррита и графита (рис. IV, а).

Серый феррито-перлитный чугун характеризуется меньшей степенью графитизации. Он образуется при распаде структурно свободного и структурно связанного цементита в ледебурите и частично в перлите. В результате образуется структурно свободный феррит. Структура чугуна состоит из феррита, перлита и графита.

Серый перлитный чугун образуется, когда цементит, входящий в состав ледебурита, и вторичный цементит полностью распадаются. Структура перлитного серого чугуна после окончательных превращений состоит из перлита и графита (рис. IV, б).

Свойства серого чугуна зависят от структуры металлической основы и от формы, размера и количества графитных включений. Чем меньше в металлической основе феррита, тем выше прочность чугуна. Пластинчатые включения графита нарушают однородность металличе-

ской основы, играя роль надрезов. Лучшими механическими свойствами обладает чугун со структурой перлита, содержащий графит в виде мелких, равномерно распределенных пластинок.

Серый чугун маркируют буквами и цифрами. Буква С обозначает серый, Ч — чугун, цифры после букв указывают среднее временное сопротивление при растяжении (табл. 5).

5. Механические свойства серого чугуна

Марка чугуна	Предел прочности при растяжении, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Предел прочности при изгибе, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Твердость НВ
СЧ10	98 (10)	274 (28)	143...229
СЧ15	147 (15)	314 (32)	163...229
СЧ18	176 (18)	358 (36)	170...229
СЧ20	196 (20)	392 (40)	170...241
СЧ21	206 (21)	392 (40)	170...241
СЧ24	235 (24)	421 (44)	170...241
СЧ25	245 (25)	451 (46)	180...250
СЧ30	294 (30)	490 (50)	181...255
СЧ35	343 (35)	539 (55)	197...269
СЧ40	392 (40)	588 (60)	207...285
СЧ45	441 (45)	637 (65)	229...289

Нередко серые чугуны подвергают модифицированию добавлением в них перед разливкой специальных добавок — модификаторов (75%-ный ферросилиций, силикокальций и др.). Модифицирование применяют для получения в чугунных отливках перлитной металлической основы с вкраплением небольшого количества изолированных пластинок графита среднего размера.

Модифицированию подвергают перлитный серый чугун, содержащий сравнительно небольшое количество кремния и повышенное количество марганца. Этот чугун без введения модификатора имеет половинчатую структуру, которая состоит из ледебурита, перлита и графита. Такой чугун содержит 2,8...3,3% углерода.

Существуют специальные антифрикционные чугуны (АСЧ-1, АСЧ-2, АСЧ-3). Они имеют малый коэффициент трения, поэтому из них изготавливают подшипники скольжения, втулки и другие детали, работающие чаще в присутствии смазки.

Детали, предназначенные для работы в паре с закаленными или нормализованными валами, рекомендуется изготавливать из чугунов АСЧ-1 и АСЧ-2, в структуре

которых содержится не менее 85% перлита. Детали из перлитно-ферритного чугуна АСЧ-3 применяют для работы в паре с незакаленными стальными валами. В структуре этого чугуна содержится около 60% перлита, что снижает его износостойчивость.

Трущиеся детали, работающие при повышенных температурах (например, поршневые кольца), делают из перлитного чугуна с повышенным содержанием фосфора. Его структура состоит из тонкопластинчатого перлита, фосфидной эвтектики, равномерно распределенной по всему объему, и пластинчатого графита.

§ 4. Высокопрочный чугун

Высокопрочный чугун получают модифицированием магнием или церием. При этом в чугуне образуется шаровидный (сфероидальный) графит, из-за которого повышаются прочность и пластичность чугуна (табл. 6).

6. Механические свойства высокопрочного чугуна

Марка чугуна	Предел прочности при растяжении, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Предел текучести при растяжении, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Относительное удлинение, %	Твердость НВ
ВЧ38-17	373 (38)	235 (24)	17	140...170
ВЧ42-12	412 (42)	274 (28)	12	140...200
ВЧ45-5	441 (45)	333 (33)	5	160...220
ВЧ50-7	490 (50)	343 (35)	7	171...241
ВЧ50-2	490 (50)	343 (35)	2	180...260
ВЧ60-2	588 (60)	393 (40)	2	200...280
ВЧ70-2	686 (70)	441 (45)	2	229...300
ВЧ80-2	784 (80)	490 (49)	2	250...330
ВЧ100-2	981 (100)	689 (70)	2	270...360
ВЧ120-2	1177 (120)	882 (90)	2	302...380

Высокопрочный чугун, обозначаемый буквами ВЧ, подразделяют на марки в зависимости от механических свойств, причем основными показателями являются предел прочности при растяжении (первые цифры в обозначении марки) и относительное удлинение (вторая цифра).

Чугуны высокого качества (ВЧ60-2, ВЧ45-5 и ВЧ42-12) между собой отличаются главным образом

структурой металлической основы, которая обуславливает их разную прочность. У чугуна ВЧ60-2 структура перлитная, у ВЧ45-5 — феррито-перлитная, а у ВЧ42-12 — ферритная (рис. V, а).

Высокая прочность и пластичность этих чугунов позволяют делать из них ответственные детали. Например, коленчатый вал легковой автомашины «Волга» изготовлен из высокопрочного чугуна ВЧ60-2, имеющего следующий состав: 3,4...3,6% С; 1,8...2,2% Si; 0,96...1,2 Mn; 0,16...0,30% Cr; менее 0,01% S; менее 0,06% P и 0,01...0,03 Mg.

Чугуны со столь узкими пределами содержания элементов и низким содержанием серы и фосфора выплавляют не в вагранке, а в электрической печи. Это обстоятельство в сочетании с термической обработкой приводит к получению еще более высоких свойств, чем указано в таблице 6.

§ 5. Ковкий чугун

Ковким чугуном называют чугун с хлопьевидным графитом, который получают из белого чугуна отжигом. Для этого отливки из белого чугуна нагревают до 950...1000 °С, а затем после длительной выдержки медленно охлаждают до нормальной температуры (рис. 5.18).

В результате длительной выдержки происходит распад цементита с образованием графита хлопьевидной формы (рис. V, б). Для получения структуры феррит + хлопьевидный графит в процессе отжига должны быть разложены цементит ледебурита (эвтектический), вторичный цементит и цементит перлита (эвтектоидный).

Распад эвтектического и вторичного цементита происходит при 950...1000 °С (первая стадия графитизации), распад эвтектоидного перлита — при 720 °С или при медленном охлаждении в интервале 760...720 °С (вторая стадия графитизации). Для получения ковкого чугуна со структурой перлит + хлопьевидный

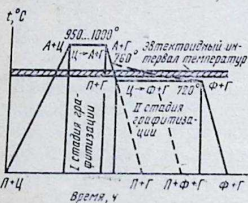


Рис. 5.18. График ступенчатого отжига ковкого чугуна.

7. Механические свойства ковкого чугуна

Марка чугуна	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ² (кгс/мм ²)	Относительное удлинение, %	Твердость НВ
КЧ30-6	294 (30)	6	100...163
КЧ33-8	323 (33)	8	100...163
КЧ35-10	333 (35)	10	100...163
КЧ37-12	362 (37)	12	110...163
КЧ45-7	441 (45)	7	150...207
КЧ50-5	490 (50)	5	170...230
КЧ55-4	539 (55)	4	192...241
КЧ60-3	588 (60)	3	200...269
КЧ65-3	637 (65)	3	212...269
КЧ70-2	686 (70)	2	241...285
КЧ80-1,5	784 (80)	1,5	270...320

графит вторую стадию графитизации не проводят, а для получения структуры феррит + перлит + хлопьевидный графит проводят частично.

Ковкий чугун маркируют следующим образом. Буквы КЧ означают ковкий чугун. После них стоят цифры, показывающие предел прочности при разрыве, и цифры, показывающие относительное удлинение (табл. 7).

В сельскохозяйственном и тракторном машиностроении ковкий чугун применяют для изготовления муфт, втулок, корончатых гаек, храповиков, рычагов, кронштейнов, звездочек и т. п.

§ 6. Чугун с особыми физическими свойствами

Для работы при высоких температурах (около 1000 °С) применяют детали из жаростойкого (окалиностойкий) чугуна, который обладает высокой

8. Механические свойства окалиностойкого чугуна

Марка чугуна	σ_B , Н/мм ²	$\sigma_{ц}$, Н/мм ²	НВ	Примечание
ЖЧХ-0,9	180	360	207...285	—
ЖЧХ-1,5	150	320	207...285	—
ЖЧХ-2,5	—	320	228...363	—
ЖЧХ-5,5	100	240	140...255	Силал
ЖЧСШ-5,5-0,1	220	—	228...321	Силал с шаровидным графитом
ЖЧНДХ-15-7-2	180	—	120...197	Нирезист

окалино- и ростоустойчивостью. Окалиностойкости достигают легированием чугуна хромом в количестве до 2,5% и кремнием в количестве 6% (табл. 8).

Глава V. ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В СПЛАВАХ ЖЕЛЕЗА С УГЛЕРОДОМ

§ 1. Превращения в стали при нагреве

Структура железоуглеродистых сплавов при нормальной температуре обусловлена содержанием углерода и скоростью охлаждения ниже линий GS и SE (см. рис. 5.11). В результате медленного охлаждения доэвтектоидные стали приобретают структуру феррита и перлита, эвтектоидные — перлита, заэвтектоидные — перлита и вторичного цементита. Если эти стали нагревать, то они будут претерпевать фазовые и структурные превращения при критических температурах. Критические точки (температуры), обуславливающие превращения в стали на линии PSK , обозначают A_{c1} (при нагревании) и A_{r1} (при охлаждении); на линии $MO - A_{c2}$ и A_{r2} ; на линии $GS - A_{c3}$ и A_{r3} ; на линии $HIB - A_{c4}$ и A_{r4} и на линии $SE - A_{cm}$.

Рассмотрим превращения, протекающие в стали с различным содержанием углерода при ее нагреве выше критических температур. При нагреве доэвтектоидной стали до температурной зоны между линиями PS и GS (A_{c1} и A_{c3}) сталь будет состоять из феррита и аустенита. При дальнейшем нагреве (выше точки A_{c3}) структура этой стали станет чисто аустенитной. Ниже точки A_{c1} (727°C) доэвтектоидная сталь состоит из феррита и перлита. При очень медленном нагреве перлит превращается в аустенит при постоянной температуре 727°C (линия PS).

Превращение перлита в аустенит можно наглядно проследить по схеме, приведенной на рисунке 5.19. В исходном состоянии сталь состоит из кристалликов цементита, окруженных ферритом (рис. 5.19, а). При нагреве несколько выше A_{c1} образуются участки аустенита (рис. 5.19, б), в которых растворяется цементит. Слой аустенита, непосредственно прилегающий к цементиту, будет наиболее сильно насыщен углеродом.

Образовавшиеся зародыши аустенита развиваются в результате растворения цементита и превращения фер-

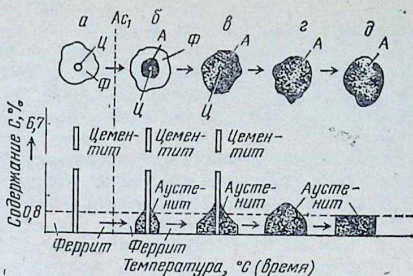


Рис. 5.19. Схема образования аустенита из перлита (феррито-цементитной смеси) в эвтектондной стали:

а — структура стали в исходном состоянии (цементит, окруженный ферритом); *б* — образование участка аустенита; *в* — полное превращение феррита в аустенит; *г* — растворение цементита в аустените; *д* — выравнивание концентрации углерода.

рита. Однако скорость роста кристаллов аустенита за счет феррита всегда больше, чем за счет цементита, поэтому после превращения феррита в аустенит еще сохраняется некоторое количество цементита (рис. 5.19, *в*), который при дальнейшем увеличении температуры или выдержки растворяется в аустените (рис. 5.19, *г*).

После превращения феррита и даже полного растворения цементита аустенит оказывается неоднородным по содержанию углерода. Для выравнивания концентрации углерода по всему объему кристаллов аустенита (рис. 5.19, *д*) необходимо дальнейшее повышение температуры (скорость диффузии углерода возрастает) или увеличение времени выдержки.

Заэвтектондные стали при нагреве до температуры первой критической точки имеют структуру, состоящую из перлита и вторичного цементита. При дальнейшем нагреве перлит превращается в аустенит. Таким образом, в температурной зоне между точками A_{c1} и A_{cm} заэвтектондные стали имеют структуру аустенита и вторичного цементита. Зерно аустенита возникает при окончании превращения перлита в аустенит.

Различают начальное, действительное и природное зерна. Под начальным (исходное) зерном понимают зерно, полученное в момент полного превращения перлита в аустенит. Однако образовавшиеся сначала мелкие зер-

на аустенита неустойчивы и растут в зависимости от температуры нагрева и времени выдержки.

Начальный размер зерна аустенита зависит от количества зародышей, возникающих в данном объеме в единицу времени, и скорости их роста. Чем дисперснее были частицы цементита в перлите, тем мельче начальное зерно аустенита.

Действительное зерно получается после термической обработки. Размер действительных зерен в значительной мере определяет конечные свойства стали. Их размеры зависят от температуры и времени выдержки в надкритической области и от содержания углерода в стали. Размер исходного зерна аустенита часто решительным образом влияет на размер действительных зерен, а следовательно, и на механические свойства стали после ее закалки.

Склонность к росту зерна аустенита у сталей одного состава, но выплавляемых в различных условиях может быть разной, поэтому различают наследственно мелкозернистые и наследственно крупнозернистые стали.

Наследственное (природное) зерно получается при нагреве стали до 930...950 °С с последующим быстрым охлаждением, фиксирующим полученный при этой обработке размер зерна аустенита.

Нагрев стали до высоких температур, приводящий к образованию крупного действительного зерна, принято называть перегревом стали. Перегретая сталь имеет крупнокристаллический излом, который проходит по границам зерен. Перегрев может быть устранен повторной обработкой стали нагревом до температуры несколько выше точки A_{c3} .

Еще более высокий нагрев вызывает неустранимый пережог стали, который сопровождается образованием по границам зерен участков, обогащенных углеродом, неокисленных пустот и пузырей и даже включений окислов железа. При пережоге излом стали камневидный.

§ 2. Превращение переохлажденного аустенита

Исследованиями установлено, что скорость и характер распада аустенита зависят от степени его переохлаждения. Наиболее полное представление о превращениях, которые претерпевает аустенит при различ-

ных степенях переохлаждения, дает диаграмма изотермического превращения аустенита (рис. 5.20).

Диаграмма построена в координатах температура — логарифм времени (время откладывают на оси абсцисс по логарифмической шкале), что дает возможность проследить за временем превращения от долей секунды до суток и более.

Для простоты предположим, что за 0,5 с удается охладить образец из аустенитного состояния до любой температуры (от точки Ar_1 до 0°C и ниже). Охлаждая образец до 700°C , заметим, что в течение времени до точки H_1 в аустените никаких превращений не происходит.

Со времени, соответствующего точке H_1 , начинается распад аустенита. Период до точки H_1 называют инкубационным периодом. Распад аустенита заканчивается полностью ко времени точки K_1 (аустенит превратился в перлит). Скорость дальнейшего охлаждения не влияет на структуру образца, поэтому за точкой K_1 пунктирная линия обрывается.

Наблюдая за образцом, охлажденным из аустенитного состояния до 650°C , и нанося на диаграмму точки начала H_2 и конца K_2 распада аустенита, заметим, что инкубационный период и период распада аустенита уменьшились, а в результате распада получился сорбит (рис. VI, а). Сорбит — механическая смесь цементита и феррита, подобная перлиту, но размеры пластинок цементита меньше (десятые доли микрона), чем у перлита.

Образцу, охлажденному до температуры около 500°C , на диаграмме соответствуют точки H_3 и K_3 начала и конца распада аустенита, а структура стали представляет троостит (рис. VI, б и в). Троостит — механическая смесь цементита и феррита, подобная перлиту и сорбиту, однако дисперсность его выше, чем у сорбита, а размеры пластинок цементита соответствуют стотысячным и миллионным долям миллиметра.

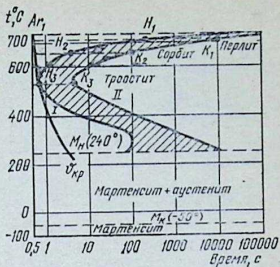


Рис. 5.20. Диаграмма изотермического распада аустенита эвтектоидной стали.

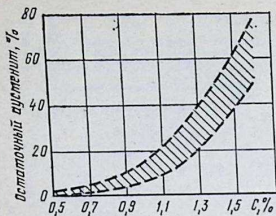


Рис. 5.21. Влияние содержания углерода на количество остаточного аустенита в закаленной стали.

тенсит. Окончание превращения аустенита в мартенсит происходит лишь при -50°C (для эвтектоидной стали).

Мартенсит — это пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе (рис. VII). При скорости охлаждения $150\text{--}200$ град/с успевает завершиться лишь перегруппировка атомов железа, диффузионные процессы затруднены, поэтому весь углерод остается в виде твердого раствора в α -железе.

Из всех продуктов распада аустенита (кроме цемента) мартенсит обладает максимальной твердостью и минимальной пластичностью. Превращение аустенита в мартенсит в отличие от превращения аустенита в феррито-цементитную смесь носит бездиффузионный (сдвиговый) характер и протекает только в интервале температур между началом M_n и концом M_k мартенситных превращений и никогда не идет до конца. В закаленной стали, кроме мартенсита, всегда присутствует остаточный аустенит, количество которого зависит от содержания углерода в стали (рис. 5.21), а также от скорости охлаждения в температурной области ниже начала мартенситных превращений.

Структура мартенсита игольчатая. Иглы его, как правило, расположены относительно друг друга под углом 60 или 120° и характеризуют те плоскости, по которым произошли сдвиги в кристаллической решетке. Скорость образования мартенситных игл огромна (порядка 1000 м/с). Кристаллы растут быстро до определенного размера, затем рост их прекращается. Новые кристаллы растут в других направлениях. Размер пер-

При увеличении числа подобных опытов определится ряд точек начала и конца превращений аустенита. Соединяя эти точки, получим кривую I начала превращения аустенита при различных температурах и кривую II конца превращения при тех же температурах. При охлаждении образцов со скоростью выше критической при температуре 240°C (линия M_n) начинается превращение аустенита в мар-

вых игл мартенсита определяется размером исходного зерна аустенита, так как их рост наблюдается только в пределах одного зерна.

Рассмотрев диаграмму изотермического превращения аустенита (рис. 5.20), отметим в итоге следующее. Верхняя часть диаграммы (выше M_n) характеризует изотермический распад аустенита в смесь феррита и цементита. Причем чем больше скорость охлаждения аустенита, тем больше интервал температур, в котором происходит его распад, и тем дисперснее получается феррито-цементитная смесь. По диаграмме можно установить, каким образом и с какой скоростью нужно охладить данную сталь, чтобы получить нужное строение, а следовательно, и свойства.

Левее кривой *I* находится область, отвечающая переохлажденному аустениту, область между кривыми *I* и *II* определяет время распада переохлажденного аустенита; правее кривой *II* находится область продуктов распада аустенита (перлит, сорбит, троостит). Инкубационный период распада аустенита изменяется в зависимости от степени переохлаждения последнего (сначала уменьшается до некоторой критической величины, а затем вновь увеличивается). Этот период для каждой температуры определяется абсциссой кривой *I*. Кривая *II* показывает, что длительность превращения также зависит от температуры переохлаждения.

В доэвтектоидной стали превращение начинается при более высокой температуре между критическими точка-

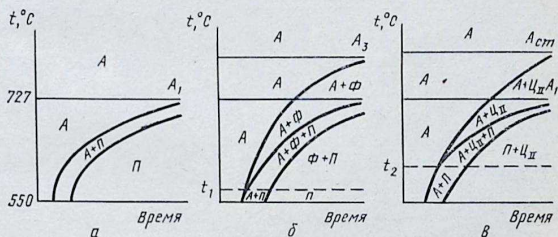


Рис. 5.22. Диаграммы изотермического превращения в перлитном интервале температур:

a — в эвтектоидной стали; *б* — в доэвтектоидной стали (0,4% углерода); *в* — в заэвтектоидной стали (1% углерода).

ми A_3 и A_1 и заключается в выпадении избыточного феррита, в результате чего аустенит обогащается углеродом и далее происходит перлитное превращение (рис. 5,22. б).

В заэвтектоидной стали (рис. 5.22, в) в интервале температур между точками A_{cm} и A_1 из аустенита выделяется вторичный цементит, содержание в аустените углерода уменьшается и далее происходит перлитное превращение.

Ниже температуры t_1 в доэвтектоидной и t_2 в заэвтектоидной стали аустенит превращается непосредственно в перлитные структуры без предварительного выпадения избыточного феррита или вторичного цементита. Диаграмма изотермического превращения в перлитном интервале для эвтектоидной стали приведена на рисунке 5.22, а.

§ 3. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении

Распад аустенита при температуре, близкой к A_{r1} , происходит лишь в условиях равновесия, то есть при бесконечно малой скорости охлаждения. При реальных скоростях охлаждения аустенит переохлаждается ниже A_{r1} и распад его протекает в интервале температур.

Распад аустенита состоит из следующих этапов:

превращение γ -железа в α -железо, то есть перегруппировка атомов из решетки гранцентрированного куба в решетку объемноцентрированного куба с одновременным смещением атомов углерода;

выделение из твердого раствора (из аустенита) мельчайших частиц цементита;

укрупнение частиц цементита в пластинки, размеры которых достигают нескольких микрон.

С увеличением скорости охлаждения возрастает степень переохлаждения аустенита и снижается интервал температур, в котором происходит распад аустенита (рис. 5.23, а).

На рисунке 5.23, б приведены схематические диаграммы, показывающие влияние скорости охлаждения на температуру распада аустенита и на количество структурных составляющих после охлаждения в углеродистой эвтектоидной стали. Температуру начала распада пере-

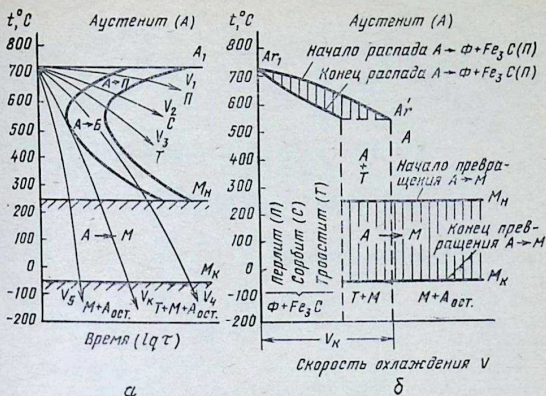


Рис. 5.23. Наложение кривых охлаждения (а) на диаграмму изотермического распада аустенита и схема влияния скорости охлаждения на температуру превращения аустенита (б).

охлажденного аустенита в отличие от равновесной точки Ar_1 обозначают $A'r$.

Чем больше скорость охлаждения и ниже температура распада аустенита, тем дисперснее образующаяся феррито-цементитная смесь. При небольшой скорости охлаждения V_1 образуется перлит, при большей V_2 — сорбит, а при еще большей V_3 — троостит.

При высоких скоростях охлаждения V_4 весь аустенит не успевает распасться при высоких температурах с образованием феррито-цементитной смеси и часть его переохлаждается до точки M_N , превращаясь в мартенсит. Структура в этом случае состоит из троостита и мартенсита. Минимальная скорость охлаждения V_K , при которой весь аустенит переохлаждается до точки M_N и превращается в мартенсит, получила название критической скорости закалки.

При очень большой скорости охлаждения V_5 диффузионный распад аустенита с образованием феррито-цементитной смеси становится невозможным, вследствие чего весь аустенит переохлаждается до точки M_N и превращается в мартенсит.

Превращение аустенита в мартенсит не идет до конца, поэтому в закаленной стали вместе с мартенситом всегда присутствует некоторое количество остаточного аустенита (рис. VIII).

§ 4. Превращение мартенсита и остаточного аустенита при нагреве

Изучение микроструктуры, атомно-кристаллического строения, физических и механических свойств в отпущенном состоянии и изменение этих свойств в процессе отпуска позволили с необходимой достоверностью установить последовательность превращения при нагреве закаленной стали.

Исходной после закалки является неравновесная структура, состоящая из мартенсита и остаточного аустенита. Переход стали в более устойчивое состояние должен сопровождаться распадом мартенсита и остаточного аустенита с образованием феррито-цементитной смеси.

Исследования показали, что, начиная от 80°C и вплоть до 200°C , наблюдается сокращение объема образца из-за уменьшения параметра c решетки мартенсита (рис. 5.24). Отношение параметров решетки $c:a$ стремится к единице. Это превращение называют первым превращением при отпуске.

Получающийся при таком низком отпуске мартенсит, у которого отношение $c:a$ близко к единице, называют отпущенным мартенситом (рис. IX). Следовательно, первое превращение есть превращение тетрагонального мартенсита в отпущенный, почти кубический с образованием неособобившихся частиц метастабильного карбида.

Тетрагональность мартенсита обусловлена растворением углерода, поэтому уменьшение тетрагональности можно объяснить выделением углерода из раствора (с ребер решетки).

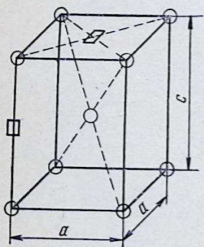


Рис. 5.24. Тетрагональная решетка мартенсита (кружками обозначены атомы железа, четырехугольниками — атомы углерода).

Дальнейший нагрев выше 200 °С ведет к так называемому второму превращению при отпуске, который охватывает интервал температур 200...300 °С. В этом интервале остаточный аустенит превращается в отпущенный мартенсит. Это превращение диффузионное и по своей природе похоже на превращение первичного аустенита в промежуточном интервале температур.

К концу второго превращения наступает полное выделение углерода из раствора, снятие внутренних напряжений. Одновременно с этим метастабильный карбид обособляется и превращается в цементит. Сумму этих изменений называют третьим превращением при отпуске.

При 400 °С третье превращение заканчивается и структура стали состоит из феррита и цементита. При дальнейшем повышении температуры наблюдают процесс коагуляции зерен феррита и цементита.

Следует заметить, что есть существенное различие между строением феррито-цементитной смеси, полученной после распада мартенсита при отпуске, и строением аустенита. Например, цементит троостита закалки имеет ярко выраженную игольчатую форму, а троостита отпуски — зернистую. Различная форма цементита определяет различие свойств сталей.

Глава VI. ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

§ 1. Общие сведения

Тепловая (термическая) обработка металлов и сплавов — это технологический процесс, связанный с нагревом и охлаждением, вызывающий изменение внутреннего строения сплава и, как следствие этого, изменение механических, физических и других свойств. Тепловой обработке подвергают заготовки для придания металлу надлежащих свойств обрабатываемости и готовые изделия в качестве окончательной операции, придающей материалу требуемые свойства. В зависимости от этого термическую обработку разделяют на предварительную и окончательную.

Термическая обработка состоит из нагрева, выдержки при определенной температуре и охлаждения. Причем

в большинстве случаев решающая роль в получении желаемой структуры и свойств принадлежит охлаждению. Нередко термический цикл оказывается более сложным. Он может содержать несколько нагревов и охлаждений.

При выборе режима термической обработки рекомендуют использовать диаграммы состояния сплавов (например, для черных сплавов диаграмму состояния железо — цементит).

Основные виды термической обработки — это отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

§ 2. Отжиг

Отжигом называют нагрев стали до температур выше фазовых превращений, выдержку при данной температуре и последующее медленное охлаждение (обычно вместе с печью). Цель отжига зависит от видов отжига.

Скорость охлаждения при отжиге должна обеспечить распад аустенита на феррито-цементитную смесь (перлит). Для углеродистых сталей она составляет 150...200 град/ч, для низколегированных — 30...50 град/ч.

После отжига структура у доэвтектоидных сталей состоит из перлита и феррита, у эвтектоидной стали — из перлита, у заэвтектоидных сталей — из перлита и вторичного цементита. Форма цементита при этом обычно пластинчатая.

В зависимости от температуры нагрева различают диффузионный отжиг (гомогенизация), полный отжиг, неполный отжиг, отжиг на зернистый перлит, изотермический отжиг.

Диффузионный отжиг обычно применяют в тех случаях, когда в сплаве наблюдается дендритная или внутрикристаллическая ликвация. При этом виде отжига используют процесс диффузии в твердом растворе, приводящий к выравниванию в стали концентрации углерода и примесей. Иногда диффузионный отжиг называют гомогенизацией, потому что цель такого отжига — сделать сталь однородной (гомогенной).

Отжиг осуществляют нагревом стали выше $A_{с3}$ на 150...300° (рис. 5.25), длительной выдержкой при данной температуре и последующим медленным охлаждением. Диффузионный отжиг применяют главным обра-

зом для крупных фасонных отливок и слитков из легированной стали. Продолжительная выдержка при столь высоких температурах неизбежно приводит к большому размеру зерна, то есть к перегреву стали, что, как известно, легко исправить нормализацией.

При полном отжиге сталь нагревают выше критической точки A_{c3} на $30...50^\circ$, выдерживают при данной температуре, а затем медленно охлаждают (рис. 5.25). Этот вид отжига проводят для того, чтобы снизить твердость, повысить пластичность и вязкость, то есть привести сталь в равновесное состояние. Полный отжиг применяют для доэвтектоидных углеродистых и легированных сталей, находящихся в неравновесном состоянии, то есть когда сталь закалена, недоотпущена, после горячей обработки давлением.

Для заэвтектоидных сталей полный отжиг не применяют, так как при медленном охлаждении этих сталей с температур выше A_{cm} вторичный цементит выделяется по границам зерен аустенита и при нормальной температуре сохраняется в виде сетки, окаймляющей зерна перлита, что придает стали хрупкость.

Неполным отжигом называют нагрев стали выше критической точки A_{c1} на $30...50^\circ$, выдержку при данной температуре и последующее медленное охлаждение (рис. 5.25). Данный отжиг является наиболее общим видом термической обработки, потому что он может быть применен не только к сталям, но и ко всем металлическим материалам, в которых возникают внутренние напряжения.

При неполном отжиге наблюдают только частичную перекристаллизацию. Избыточный феррит в доэвтектоидных сталях или цементит в заэвтектоидных сталях не

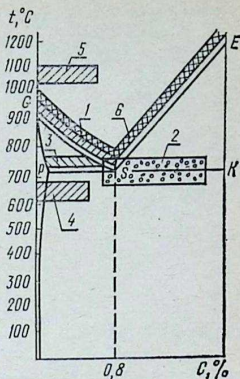


Рис. 5.25. Температуры нагрева стали при отжиге и нормализации:

1 — полный отжиг доэвтектоидной стали; 2 — неполный отжиг заэвтектоидной стали; 3 — неполный отжиг доэвтектоидной стали; 4 — низкотемпературный отжиг и рекристаллизационный отжиг; 5 — диффузионный отжиг; 6 — нормализация.

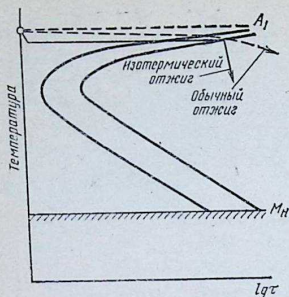


Рис. 5.26. Схема изотермического и обычного отжига.

переходит в твердый раствор (аустенит). Неполный отжиг для доэвтектоидных сталей применяют только для исправления структуры (измельчение зерна) после обработки давлением. Такому отжигу подвергают главным образом эвтектоидную и заэвтектоидные стали для снятия внутренних напряжений, снижения твердости, повышения пластичности и улучшения обрабатываемости резанием.

Отжиг на зернистый перлит производят следующим образом. Сталь, имеющую структуру пластинчатого перлита, медленно нагревают до температуры немного выше критической точки A_{c1} (около 740°C), длительно выдерживают при данной температуре (примерно 5 ч), затем медленно охлаждают до температуры ниже критической точки A_{r1} (около 680°C) и опять выдерживают примерно 5 ч. После этого весь процесс повторяют до получения необходимой степени сфероидизации цементита. Иногда этот отжиг называют циклическим.

Цель такого отжига — перевод пластинчатого перлита в зернистый, что влечет за собой снижение твердости и прочности, улучшение обрабатываемости режущим инструментом.

При **изотермическом отжиге** сталь нагревают, как и для обычного полного отжига, и сравнительно быстро охлаждают до температуры, лежащей ниже критической точки A_{c1} на $50\text{...}100^\circ$, и при данной температуре выдерживают до полного распада аустенита на перлит (рис. 5.26). После выдержки охлаждение ведут на воздухе.

Температура изотермической выдержки существенно влияет на получающуюся структуру и свойства стали. С понижением температуры изотермической выдержки, то есть с увеличением степени переохлаждения аустенита, цементит измельчается и получается более дисперсная феррито-цементитная смесь. Изотермический отжиг

применяют главным образом для легированных сталей. Преимущество изотермического отжига заключается в небольшой длительности технологического цикла.

§ 3. Нормализация

Нормализацией называют нагрев доэвтектоидных сталей выше критической точки A_{c3} , эвтектоидной и заэвтектоидных сталей — выше A_{cm} на $30...50^\circ$ (рис. 5.25), непродолжительную выдержку и последующее охлаждение на спокойном воздухе. После нормализации углеродистые стали имеют ту же структуру, что и после отжига, но перлит в них более дисперсен, а механические свойства более высокие (повышенная прочность и твердость).

По сравнению с отжигом нормализация более экономичный процесс (нет операции охлаждения металла вместе с печью), который широко применяют в практике и часто используют как окончательный вид термической обработки.

Назначение нормализации различно и зависит от состава стали. Для низкоуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо отжига. При повышении твердости нормализация обеспечивает большую производительность при обработке резанием и получение более чистой поверхности.

Для отливок из среднеуглеродистой стали нормализацию или нормализацию с высоким отпуском применяют вместо закалки и высокого отпуска. В этом случае механические свойства несколько ниже, но детали будут подвергнуты меньшей деформации, чем при закалке, и вероятность появления трещин практически исключается.

Нормализацию с высоким отпуском ($600...650^\circ\text{C}$) часто используют для исправления структуры легированных сталей вместо полного отжига, так как производительность и трудоемкость этих двух операций выше, чем одного отжига.

§ 4. Закалка

Закалкой называют термическую операцию, состоящую из нагрева стали выше критической точки A_{c3} на $30...50^\circ$ (для доэвтектоидных сталей) или A_{c1} (для

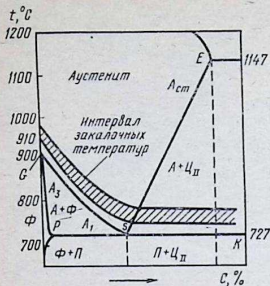


Рис. 5.27. Температурный интервал нагрева углеродистых сталей для закалки.

железо — цементит (рис. 5.27). Доэвтектоидные стали нагревают под закалку на $30...50^\circ$ выше линии GS , в результате чего их перлитно-ферритная структура превращается в аустенит. Последний при охлаждении со скоростью больше критической превращается в мелконгольчатый мартенсит при небольшом количестве остаточного аустенита. Данный способ называют полной закалкой.

Если перед закалкой доэвтектоидную сталь нагреть до температуры, лежащей между линиями PS и GS , то произойдет лишь частичная перекристаллизация стали и, кроме аустенита, останется некоторое количество феррита, который в процессе закалки (при быстром охлаждении) не претерпит изменения. Полученная структура после закалки будет состоять из мартенсита и феррита, который снизит твердость закаленной стали. Такую закалку доэвтектоидной стали называют неполной. Применяют ее крайне редко.

Эвтектоидные и заэвтектоидные стали нагревают перед закалкой на $30...50^\circ$ выше точки A_{c1} , то есть применяют неполную закалку. Структура эвтектоидной стали при температуре нагрева состоит из аустенита (однофазная структура), а заэвтектоидной — из аустенита и вторичного цементита (двухфазная структура). После быстрого охлаждения в структуре эвтектоидной стали будут мартенсит и остаточный аустенит, а в заэвтектоидной — мартенсит, вторичный цементит и остаточный

заэвтектоидных сталей), выдержки при этой температуре и последующего быстрого охлаждения со скоростью выше критической. При закалке повышаются прочность и твердость при сохранении достаточной вязкости.

На результат закалки влияют температура нагрева, скорость нагревания, выдержка при температуре нагрева и охлаждение от температуры закалки.

Температура нагрева зависит от содержания в стали углерода и выбирается по нижней части диаграммы

аустенит. Из заэвтектоидных сталей в основном изготовляют инструмент, от которого требуются высокая твердость и износоустойчивость, поэтому присутствие вторичного цементита в виде мелких, равномерно распределенных по всему объему зернышек желательны.

Неполная закалка является для заэвтектоидной стали нормальной, поэтому совершенно обязательно наличие в исходной структуре зернистого перлита. Если исходной структурой будет пластинчатый перлит и цементит в виде сетки, то после закалки получится структура мартенсит и сетка цементита, которая делает сталь хрупкой.

Изделие необходимо некоторое время выдержать при температуре нагрева для равномерного прогрева по всему сечению и завершения всех превращений. Время выдержки, так же как и время нагрева, зависит от многих факторов, влияющих на процессы растворения, и структурных превращений, происходящих в стали.

Например, для нагрева, включая и выдержку, круглых изделий из углеродистых сталей при закалке рекомендуют следующие нормы времени: в пламенной печи — 1 мин; в соляной ванне — 0,5 мин на 1 мм сечения. Время нагрева изделий из легированной стали должно быть больше на 25...50%.

Скорость охлаждения оказывает решающее влияние на результат закалки. Различные скорости охлаждения получают, применяя различные охлаждающие среды (вода, масло и др.). Особенно важно, чтобы охлаждающая среда обеспечивала большую скорость охлаждения стали в пределах 650...500 °С во избежание распада аустенита на феррито-цементитную смесь. С другой стороны, необходимо несколько замедлить охлаждение стали в области температур 200...300 °С, так как здесь идет образование мартенсита, сопровождающееся увеличением объема металла и появлением больших внутренних напряжений. Последние могут привести к деформации (коробление) закаливаемых изделий и образованию закалочных трещин.

Сравнивая охлаждающую способность воды и масла, следует отметить, что вода охлаждает гораздо быстрее, чем масло: в 4 раза быстрее при 550...650 °С и в 10 раз быстрее при 200...300 °С. Вот почему воду применяют для охлаждения сталей с большой критической скоростью закалки (углеродистые стали), а масло — для охлажде-

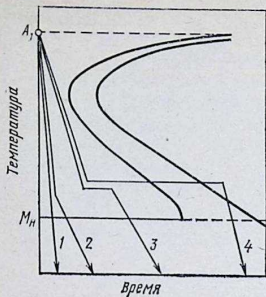


Рис. 5.28. Кривые охлаждения при различных способах закалки, нанесенные на диаграмму изотермического распада аустенита:

1 — закалка в одном охладителе; 2 — закалка в двух средах; 3 — ступенчатая закалка; 4 — изотермическая закалка.

ния стали с малой критической скоростью закалки (легированные стали).

Различные конструкционные материалы по-разному воспринимают закалку и на неодинаковую глубину. *Закаливаемость* — способность стали существенно повышать твердость при закалке. Закаливаемость в основном зависит от содержания углерода в стали. Чем больше углерода, тем выше твердость мартенсита и тем лучше закаливаемость стали. *Прокаливаемость* — способность стали принимать закалку на определенную глубину. Эта способность зависит от критической скорости охлаждения при закалке. Чем меньше эта ско-

рость, тем лучше прокаливаемость. На прокаливаемость влияют интенсивность охлаждения и содержание легирующих элементов. В зависимости от метода охлаждения различают следующие способы закалки (рис. 5.28).

Закалка в одном охладителе наиболее широко применяют на практике и главным образом для деталей простых форм. Деталь нагревают до температуры закалки и охлаждают в одном охладителе. При местной закалке в охлаждающую среду погружают только ту часть детали, которую нужно закалить.

Недостаток закалки в одном охладителе (особенно в воде) — возникновение значительных внутренних напряжений, которые могут вызвать появление трещин.

При закалке в двух средах (**прерывистая закалка**) детали нагревают обычным способом и охлаждают с необходимой скоростью до температуры, лежащей несколько выше начала мартенситного превращения (M_n). Затем их быстро переносят в менее интенсивный охладитель, где и выдерживают до полного охлаждения. Таким образом, превращение аустенита в мартенсит протекает сравнительно медленно, что способствует уменьше-

нию внутренних напряжений и деформаций. Такой способ закалки часто применяют для инструмента из углеродистой стали.

Ступенчатую закалку производят также в две стадии. Нагретое изделие быстро переносят в ванну с температурой не ниже M_n , где и выдерживают некоторое время. После этого изделие охлаждают в масле или на воздухе. Время выдержки в ванне должно обеспечивать выравнивание температуры по всему сечению изделия, но не должно вызывать распада аустенита. Этот способ применяют для закалки деталей из легированных сталей, а также деталей небольших сечений (до 10 мм) из углеродистых сталей. Недостаток этого метода в том, что горячие, медленно охлаждающиеся среды не позволяют получить необходимые скорости охлаждения для крупных деталей.

Изотермическую закалку, предложенную Д. К. Черновым, довольно широко применяют на практике. Так же как и при ступенчатой закалке, распад аустенита происходит при постоянной температуре не ниже M_n при выдержке в изотермической ванне (обычно соляной). После выдержки детали охлаждают на воздухе. В результате распада аустенита образуется игольчатый троостит, имеющий твердость HRC45...55 и достаточную пластичность. Изотермическую закалку целесообразно применять для деталей, склонных к короблению и образованию трещин.

При закалке с самоотпуском охлаждение изделия, нагретого под закалку, ведут не до конца. За счет тепла внутренних слоев детали верхний, охлажденный слой разогревается до 200...260 °С, в результате чего происходит самоотпуск. Закалку с самоотпуском применяют для зубил, кувалд, слесарных молотков и другого ударного инструмента, который должен иметь достаточно высокую твердость на поверхности и сравнительно вязкую сердцевину.

Поверхностную закалку применяют, когда деталь должна работать при переменных нагрузках, при значительном трении, когда надо получить твердую поверхность детали при мягкой сердцевине. Для этого закалывают только поверхностный слой на глубину 0,1...2 мм.

Существует несколько способов нагрева изделий под закалку: кислородно-ацетиленовым пламенем, в электролитах, током промышленной и высокой частоты.

Нагревание токами высокой частоты (т. в. ч.) — наиболее производительный и прогрессивный способ. При использовании этого способа нагревания для поверхностной закалки можно получить разный по глубине закаленный слой, закалывать детали разнообразной конфигурации, полностью автоматизировать процесс закалки. Сущность данного способа состоит в следующем. В индуктор (проводник), по которому течет переменный ток, образующий вокруг проводника переменное электромагнитное поле, помещают изделие, которое также проводит ток. Электромагнитное поле, пронизывая деталь, вызывает в ней индуцированный ток той же частоты, который и нагревает изделие. Ток течет по поверхности изделия и разогревает только эту часть.

Качество деталей, закаленных при нагревании т. в. ч., в большой степени зависит от конструкции индуктора, правильной его установки и от расстояния между индуктором и нагреваемой деталью.

Индукторы обычно изготавливают из медных трубок, по которым движется охлаждающая вода. Изготавливают индукторы, в которых нагревающая часть комбинируется с охлаждающим (душевое) устройством, называемым спрейером.

Для равномерного нагревания необходимо, чтобы расстояние от индуктора до детали было во всех точках одинаково. Обычно зазор между индуктором и нагреваемой деталью составляет 1,5...3 мм.

Для каждого типа детали изготавливают отдельный индуктор, конфигурация которого соответствует форме и размеру закалываемой детали. Наиболее распространенные конструкции одно- и многовитковых индукторов показаны на рисунке 5.29.

Источником тока высокой частоты служат машинные или ламповые генераторы. Ламповые генераторы с оптимальной частотой 15 000...60 000 Гц применяют для закалки мелких деталей и инструмента на глубину 1...2 мм. Машинные генераторы с оптимальной частотой 500...700 Гц применяют для закалки крупных деталей на глубину 3...10 мм. Для сквозной закалки и для поверхностной закалки на глубину 20...50 мм иногда используют токи промышленной частоты 50 Гц.

Кроме частоты тока, на глубину прогрева и закаленного слоя большое влияние оказывают скорость и температура нагрева. Чем больше скорость нагрева, тем

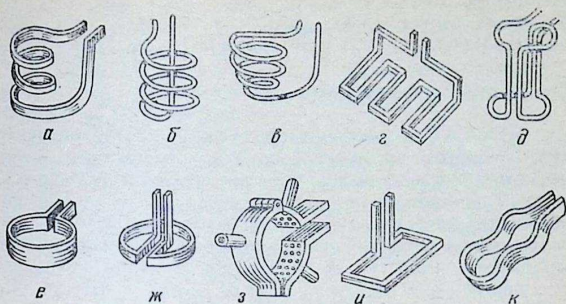


Рис. 5.29. Индукторы для нагрева:

а — наружных поверхностей цилиндрических изделий; *б* — внутренних поверхностей цилиндрических изделий; *в* — наружных поверхностей конических изделий; *г* — плит и плоскостей методом перемещения; *д* — одновременно боковых поверхностей и торцов цилиндрических изделий при вращении их вокруг вертикальной оси; *е* — наружных поверхностей цилиндрических изделий; *ж* — внутренних поверхностей цилиндрических изделий; *з* — шеек коленчатых валов; *и* — скоб сложной формы и плит методом перемещения; *к* — одного зуба зубчатого колеса при последовательной закалке.

меньше глубина прогрева. Чем выше температура нагрева, тем больше глубина закалки. Скорость нагрева зависит от мощности генератора (частоты тока) и колеблется в пределах 50...500 град/с. При данной частоте тока скорость нагрева в первую очередь зависит от магнитной проницаемости металла. Чем больше эта проницаемость, тем больше скорость нагрева. Температура закалки зависит от скорости нагрева и исходной структуры стали (дисперсность феррито-цементитной смеси) и может меняться в пределах десятков градусов. Чем дисперснее структура, тем ниже температура закалки при одной и той же скорости нагрева.

Небольшая выдержка при нагреве т. в. ч. позволяет получить после закалки более мелкое зерно, чем при обычной закалке. Кроме того, высокочастотный нагрев уменьшает коробление и не дает окалины. Закалочной средой после нагрева т. в. ч. могут быть вода, масло, растворы солей и др. После закалки т. в. ч. твердость деталей выше, чем при обычной закалке. Установки т. в. ч. полностью автоматизированы и могут быть включены в общую поточную линию производства. Недостат-

ки нагрева т. в. ч. заключены в высокой стоимости установок и сложности наладки режима нагрева и охлаждения (особенно для закалки единичных деталей).

§ 5. Отпуск

Все закаленные детали подвергают отпуску. Отпуск состоит из нагрева закаленной стали до температуры ниже A_{c1} , выдержки при заданной температуре и последующего охлаждения с заданной скоростью. Отпуск — окончательная операция термической обработки, в результате которой сталь приобретает требуемые механические свойства и структуру. Отпуск позволяет уменьшить твердость и хрупкость стали, повысить вязкость, уменьшить и снять напряжение.

В результате отпуска, в зависимости от температуры нагрева, неустойчивая структура мартенсита закалки превращается в более устойчивые структуры (мартенсит отпуска, троостит, сорбит и даже перлит). Различают низкий, средний и высокий отпуск.

Низкий отпуск получают при нагреве до 150...250 °С. При этих температурах в структуре стали сохраняется мартенсит, но с несколько измененной кристаллической решеткой, в результате чего уменьшаются твердость и внутренние напряжения. Такая структура носит название мартенсита отпуска. Низкому отпуску подвергают режущий инструмент и детали, работающие на истирание.

Средний отпуск получают при нагреве до 350...500 °С. Структура стали, отпущенная при этих температурах, состоит в основном из троостита отпуска, то есть представляет собой мелкодисперсную смесь феррита и цементита. При этом снижаются твердость и прочность, повышаются пластичность и упругость стали. Чаще всего этот вид отпуска применяют при термической обработке пружин и рессор.

Высокий отпуск осуществляют нагревом закаленных изделий до 500...650 °С. Такой нагрев стали при отпуске сопровождается образованием сорбита отпуска (феррито-цементитная смесь средней дисперсности и зернистого строения).

При высоком отпуске практически полностью снимаются внутренние напряжения в стали. Сорбитная структура дает наилучшее сочетание прочности и пластично-

сти для конструкционных сталей. Высокому отпуску подвергают большинство ответственных деталей машин и конструкций.

Закалку с высоким отпуском называют улучшением. Улучшению подвергают конструкционные стали, содержащие 0,3...0,5% углерода.

Некоторые сорта сталей, особенно специальные, при медленном охлаждении после отпуска с температуры выше 450 °С приобретают так называемую отпускную хрупкость, которая заключается в понижении ударной вязкости. Для предупреждения отпускной хрупкости после высокого отпуска изделия необходимо быстро охладить в воде или масле.

§ 6. Обработка холодом

В закаленной стали, особенно содержащей более 0,4...0,5% углерода, всегда присутствует остаточный аустенит, так как конец мартенситного превращения находится в области отрицательных температур.

Аустенит снижает твердость, износостойкость и нередко приводит к изменению магнитных свойств и размеров деталей, работающих при низких температурах, в результате самопроизвольного превращения в мартенсит.

Для уменьшения количества остаточного аустенита применяют обработку холодом, заключающуюся в охлаждении закаленной стали до отрицательных температур. Понижение температуры до —30...70 °С вызывает превращение остаточного аустенита в мартенсит, что повышает твердость сталей. Однако одновременно возрастают напряжения, поэтому охлаждение производят медленно и сразу после обработки холодом выполняют отпуск.

Обработку холодом производят сразу же после закалки, так как выдержка закаленной стали более 3...6 ч при нормальной температуре стабилизирует аустенит и он затем не полностью превращается в мартенсит, а следовательно, снижается эффект обработки холодом.

Обработку холодом производят в специальных установках, создающих отрицательную температуру, чаще всего в пределах от —75 до —195 °С.

Холодом обрабатывают измерительный инструмент, некоторые пружины, детали из цементируемых легированных сталей, сохраняющих много аустенита после закалки.

§ 7. Термомеханическая обработка

Термомеханической обработкой называют процесс, состоящий из нагрева стали до температуры выше $A_{с3}$, пластической деформации аустенита и последующего его превращения с целью получения мартенситной (чаще всего) структуры.

Наиболее распространено подразделение термомеханической обработки по температурному интервалу деформации аустенита. При температуре выше порога рекристаллизации проводят высокотемпературную термомеханическую обработку (ВТМО), а при температуре ниже порога рекристаллизации — низкотемпературную термомеханическую обработку (НТМО).

Деформация стали при ВТМО осуществляется при температуре, соответствующей области устойчивого аустенита (выше критической точки A_3), а деформация при НТМО — в температурной области метастабильного аустенита (ниже критической точки A_1 , но выше точки мартенситного превращения M_n) (рис. 5.30).

ВТМО можно подвергать любые стали, а НТМО только стали с повышенной устойчивостью переохлажденного аустенита. По сравнению с обычной закалкой после термомеханической обработки прочность повышается на 10...20%, а ударная вязкость — в 1,5...2 раза. Эффект термомеханической обработки зависит от состава стали, температуры и степени деформации и режима термической обработки (закалка и отпуск).

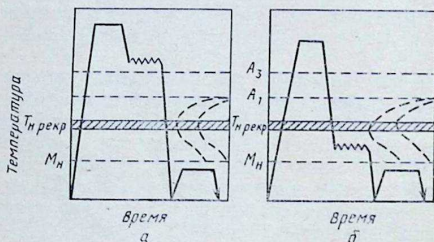


Рис. 5.30. Принципиальная схема упрочнения сталей методами термомеханической обработки: а — ВТМО; б — НТМО.

Повышение механических свойств стали в результате термомеханической обработки объясняют тем, что при пластическом деформировании (наклеп) аустенита создается мелкоблочное строение. При последующем быстром охлаждении измельченный при наклепе аустенит превращается в мартенсит тонкого строения.

§ 8. Дефекты, возникающие при термической обработке

Недогрев возникает, если сталь была нагрета ниже критической температуры. Например, если доэвтектоидную сталь нагреть до температуры немного ниже $A_{с3}$, то часть феррита останется не превращенной в аустенит. После быстрого охлаждения аустенит превратится в мартенсит, а феррит сохранится в закаленной стали. В результате структура будет состоять из мартенсита и феррита (рис. X). Феррит, имеющий низкую твердость, будет снижать общую твердость закаленной стали. Этот дефект можно исправить повышением температуры печи.

Перегрев возникает, если сталь была нагрета намного выше критической температуры или при нормальной температуре была дана очень большая выдержка.

Перегрев при отжиге приводит к росту зерен, а при сильном перегреве образуется так называемая видманштеттова структура с характерной пластинчатой формой ферритных участков, расположенных под углом друг к другу.

В результате перегрева при закалке образуется крупноигльчатый мартенсит (рис. XI). Механические свойства перегретой стали низкие. Исправить перегрев, возникший при отжиге, можно нормализацией. Сталь, перегретую при закалке, отжигают и вновь закалывают.

Пережог возникает, если сталь была нагрета близко к температуре начала плавления. Пережог характеризуется оплавлением и в связи с этим окислением металла по границам зерен. Сталь становится очень хрупкой.

Окисление и обезуглероживание стали при нагреве — результат взаимодействия ее с газами, содержащимися в печах (кислород, водород, углекислый газ). Окисление характеризуется образованием на поверхности детали окалина, а обезуглероживание — выгоранием углерода в поверхностных слоях детали с образованием структуры

феррита. Окалина, кроме невозвратной потери металла, приводит к неравномерной твердости деталей и вызывает необходимость дополнительной обработки. В результате обезуглероживания резко снижаются твердость на поверхности деталей и выносливость.

Лучшее средство, предохраняющее от окисления и обезуглероживания, — нагрев в специальных печах с нейтральным по отношению к стали газовым составом.

Закалочные трещины чаще всего возникают при слишком резком охлаждении и нагревании стали.

Для борьбы с закалочными трещинами используют равномерный нагрев и равномерное охлаждение детали; применяют закалки, которые обеспечивают медленное охлаждение в интервале мартенситного превращения (ступенчатая, изотермическая, закалка в двух средах).

Коробление возникает из-за неравномерного охлаждения отдельных частей детали. На коробление значительно влияют форма детали и способ погружения детали в охлаждающую среду.

Для борьбы с короблением необходимо правильно выбирать режим закалки (температура нагрева, скорость и способ охлаждения), применять закалку в закалочных штампах.

Мягкие пятна образуются из-за недогрева или недостаточно интенсивного охлаждения. Иногда мягкие пятна появляются из-за неоднородности исходной структуры (скопления феррита). В этих местах при нагреве может получиться аустенит с малой концентрацией углерода. Здесь даже при правильно проведенной закалке твердость будет пониженной. Этот дефект можно устранить проведением нормализации перед закалкой. Нормализация создает более однородную структуру.

Глава VII. ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

§ 1. Физические основы

Химико-термическая обработка — процесс насыщения поверхностного слоя изделий углеродом, азотом и другими элементами с целью изменения химиче-

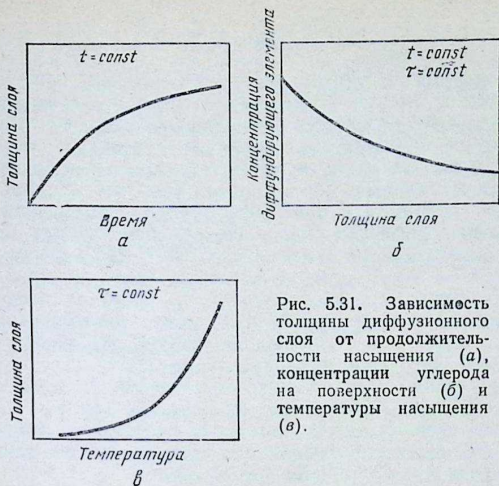


Рис. 5.31. Зависимость толщины диффузионного слоя от продолжительности насыщения (а), концентрации углерода на поверхности (б) и температуры насыщения (в).

ского состава, структуры и свойств. Процесс химико-термической обработки состоит из трех стадий:

выделение диффундирующего элемента в атомарном состоянии благодаря реакциям, протекающим во внешней среде (диссоциация);

контактирование атомов диффундирующего элемента с поверхностью стального изделия и проникновение в решетку железа (абсорбция);

диффузия атомов насыщающего элемента в глубь металла.

Диссоциация протекает в газовой среде и заключается в распаде молекул и образовании активных атомов диффундирующего элемента, например $2CO \rightarrow CO_2 + C$, $NH_3 \rightarrow 3H + N$. При этом возникают активные атомы углерода и азота, способные растворяться в металле. Степень распада молекул газа, измеряемую в процентах, называют степенью диссоциации.

Абсорбция происходит на границе газа и металла. Она заключается в поглощении (растворение) поверхностью свободных атомов. Этот процесс возможен только в том случае, если диффундирующий элемент спосо-

бен растворяться в металле изделия и образовывать твердые растворы.

Скорость диффузии атомов насыщающего элемента в решетку железа неодинакова и зависит от состава и строения образующихся фаз. При насыщении углеродом и азотом, образующими с железом твердые растворы внедрения, диффузия протекает быстрее, чем при насыщении металлами, образующими твердые растворы замещения. Поэтому при диффузионном насыщении металлами (диффузионная металлизация) процесс ведут при более высоких температурах и более долго, но, несмотря на это, получают меньшую толщину слоя, чем при насыщении азотом и углеродом. Глубина диффузии зависит от температуры и продолжительности насыщения, а также от концентрации диффундирующего элемента на поверхности изделия (рис. 5.31).

Конечная цель химико-термической обработки — упрочнение поверхностных слоев стали (повышение твердости, усталостной прочности, износоустойчивости и т. д.), изменение физико-химических и других свойств (коррозионных, фрикционных и т. д.).

Различают следующие виды химико-термической обработки стали: цементация, азотирование, цианирование, диффузионная металлизация.

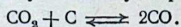
§ 2. Цементация

Цементация — процесс поверхностного насыщения стали углеродом. Обычно цементацию проводят для получения высокой твердости и износоустойчивости поверхностного слоя при достаточной вязкости сердцевины детали, чего достигают последующей термической обработкой после цементации. Цементации подвергают разнообразные изделия: зубчатые колеса, пальцы, валы, оси, рычаги, червяки, детали подшипников (крупногабаритные кольца и ролики) и др.

Цементация в твердом карбюризаторе. Карбюризатор — смесь, состоящая из древесного угля (около 70% по массе), углекислого бария (около 20...25%) и углекислого кальция (до 2,5...3,5%). Карбюризатором пересыпают обрабатываемые детали, уложенные в металлические ящики. Ящики закрывают крышками и обмазывают огнеупорной глиной, которая препятствует проникновению воздуха и печных газов внутрь ящика.

Подготовленные ящики загружают в печь и выдерживают 5...10 ч при температуре 930...950 °С. Продолжительность выдержки зависит от требуемой глубины слоя. Как правило, за 1 ч углерод проникает на глубину примерно 0,1 мм.

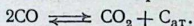
При 930...950 °С кислород воздуха, оставшийся в ящике при укладке деталей, реагирует с углеродом карбюризатора, образуя окись углерода:



В присутствии древесного угля углекислый барий при температуре 930...950 °С распадается по реакции:

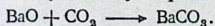


В присутствии железа окись углерода частично диссоциирует с образованием атомарного углерода:



Атомарный углерод в момент выделения обладает большой активностью и легко диффундирует в железо, максимально насыщая его поверхностные слои.

Углекислый барий обновляется за счет образующейся в ходе процесса двуокиси углерода:



Таким образом, действительным цементирующим веществом при цементации твердым карбюризатором является окись углерода.

Поверхности, не подлежащие цементации, изолируют от карбюризатора специальными обмазками или омедняют их электролитическим способом.

Цементации подвергают детали из малоуглеродистых и легированных сталей с содержанием углерода (0,1...0,25%), обеспечивающим высокую вязкость сердцевины после цементации и, следовательно, хорошее сопротивление динамическим нагрузкам. Структура сердцевины состоит из феррита и перлита. Как правило, цементированные детали содержат в поверхностном слое 0,95...1,1% углерода (рис. XII).

При газовой цементации в качестве карбюризаторов применяют различные газы и газовые смеси: природные газы, светильный газ и смеси метана, этила, пропана и других газов, получаемых при пиролизе керосина и жидких нефтепродуктов.

Для газовой цементации деталями заполняют муфели герметически закрытых печей, через которые пропускают газы в течение нескольких часов. В муфелях поддерживают температуру в пределах 900...950 °С.

Газовая цементация по сравнению с цементацией в твердых карбюризаторах имеет ряд преимуществ: скорости процесса в 2...3 раза выше; более точное регулирование насыщения углеродом; простота механизации и автоматизации; чистота рабочего места. После газовой цементации можно сразу же производить закалку, используя нагрев для цементации.

При скоростной газовой цементации изделия нагревают токами высокой частоты до 1080...1100 °С. В результате за 40...50 мин получают науглероженный слой толщиной 0,8...1 мм. После охлаждения до 870 °С изделия сразу же подвергают закалке.

После цементации детали закаливают и отпускают. Закалка цементированной стали имеет свои особенности, так как цементация сопровождается ростом зерна, а распределение углерода по сечению деталей неравномерно.

Малоответственные детали закаливают непосредственно в цементационном муфеле. В этом случае поверхностный слой детали приобретает структуру крупноигольчатого мартенсита, а сердцевина состоит из крупных зерен доэвтектоидной стали. После закалки следует низкий отпуск (150...170 °С).

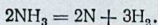
Более ответственные детали после цементации охлаждают на воздухе и затем закаливают от температуры 850...900 °С. Превращения в стали при температурах критических точек A_{c1} и A_{c3} измельчают зерно сердцевины, в результате чего после закалки структура поверхностного слоя состоит из мелкоигольчатого мартенсита, некоторого количества остаточного аустенита и цемента, а сердцевина — из мелкого зерна. Затем следует низкий отпуск.

Для особоответственных деталей производят двойную закалку. Первая закалка от температур выше точки A_{c3} (850...900 °С) приводит к измельчению структуры сердцевины. Детали охлаждают в масле или на воздухе. Вторая закалка от температур выше точки A_{c1} (760...800 °С) придает поверхностному слою структуру мелкоигольчатого мартенсита с высокой твердостью, а сердцевине — структуру неполной закалки, состоящую из сорбита и феррита.

§ 3. Азотирование

Азотированием (нитрирование) называют процесс насыщения поверхностного слоя стали или чугуна азотом. Этот процесс ведут в газообразном аммиаке (NH_3) при 430...600 °С для повышения твердости, износоустойчивости и предела прочности, а при 600...800 °С повышается только коррозионная стойкость. Азотируют главным образом легированные стали, содержащие такие элементы (хром, молибден, вольфрам, алюминий, титан), которые способны образовать с азотом прочные нитриды.

Детали перед азотированием обезжиривают и очищают от грязи, укладывают в герметический ящик так, чтобы они не касались друг друга, или подвешивают на проволоке. Затем ящик закрывают, подают аммиак, включают печь и медленно повышают температуру до заданного предела. При высокой температуре аммиак разлагается с выделением активного азота, который поглощается поверхностью:



Продолжительность азотирования зависит от требуемой толщины слоя. Считают, что за каждые 10 ч выдержки получается азотированный слой толщиной 0,1 мм. При азотировании поверхностный слой «набухает» на 0,01...0,02 мм, что учитывают при предварительной механической обработке. Детали до азотирования подвергают термической и механической обработке. Азотированные участки деталей только полируют.

Азотирование по сравнению с цементацией имеет ряд преимуществ. Его выполняют при более низкой температуре, азотированный слой обладает более высокой твердостью и износоустойчивостью, меньшей хрупкостью.

§ 4. Цианирование

Цианирование — процесс, при котором поверхности стальных деталей одновременно насыщают углеродом и азотом. Применяют твердое, жидкое и газовое цианирование. Толщина цианированного слоя обычно 0,1...0,2 мм. В результате этой обработки повышаются поверхностная твердость и износоустойчивость, сопротивляемость коррозии. Особенно эффективно циа-

нирование мелких и средних деталей (шестерни, поршни, пальцы, валики и др.).

Наиболее распространено жидкое цианирование. Его производят в ваннах с растворами цианистых солей следующего состава: 50% NaCN, 3,5% BaCl₂, 15% NaCl. При нагреве соли разлагаются с выделением активных атомов углерода и азота, которые насыщают поверхности деталей.

Низкотемпературное цианирование производят при 500...600 °С (ванна содержит 25...40% NaCN, 20...45% Na₂CO₃ и 10...20% NaCl) для упрочнения инструмента из быстрорежущей стали. Продолжительность процесса 5...30 мин, а толщина цианированного слоя 0,02...0,04 мм.

Высокотемпературному цианированию при 800...950 °С подвергают углеродистые и специальные стали с содержанием углерода до 0,4% (ванна содержит 6...10% NaCN, 80...84% BaCl₂ и до 10% NaCl). Продолжительность цианирования 1...6 ч, а толщина цианированного слоя достигает 0,5...1,5 мм.

После высокотемпературного цианирования выполняют закалку и затем низкотемпературный отпуск. Твердость поверхности после термической обработки HRC58...62. Структура цианированного слоя после закалки такая же, как и цементованного. Чем выше температура цианирования, тем больше поверхностный слой насыщается углеродом, чем ниже температура — азотом.

Газовое цианирование (нитроцементация) — обработка стальных изделий при 850...900 °С смесью, состоящей из науглероживающего и азотирующего газов (например, 70...80% природного газа и 20...30% аммиака). Продолжительность процесса для получения слоя толщиной 0,25...1 мм составляет 2...10 ч.

После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи и затем отпуск при 160...180 °С. Твердость поверхности после отпуска HRC58...62. Нитроцементации подвергают детали сложной конфигурации (шестерни), склонные к короблению. Нитроцементация получает все более широкое применение.

§ 5. Диффузионная металлизация

Процесс поверхностного насыщения стали алюминием, хромом, кремнием, бором, титаном, бериллием и другими элементами называют диффузионной

металлизацией. Ее осуществляют нагревом и выдержкой стальных изделий в контакте с одним или несколькими из указанных элементов, которые могут находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях.

Изделие, поверхность которого насыщена этими элементами, обладает ценными свойствами (высокая жаростойкость, коррозионная стойкость, повышенные износостойкость и твердость). В некоторых случаях после металлизации детали подвергают термической обработке.

Алитирование — поверхностное насыщение стали алюминием для повышения окислительной стойкости (до 850...900 °С). При нагреве алитированной стали на ее поверхности образуется плотная пленка окиси алюминия, которая в дальнейшем предохраняет металл от окисления.

Чаще всего применяют алитирование в порошкообразных смесях. Детали упаковывают в ящик, заполненный рабочей смесью, в состав которой входят порошковый алюминий (25...50%) или ферроалюминий (50...75%), окись алюминия (25...75%) и хлористый алюминий (1%). Процесс ведут при 900...1050 °С в течение 3...12 ч.

Нередко применяют алитирование в ваннах с расплавленным алюминием. Алитируемые детали погружают в расплавленный алюминий, содержащий 6...8% железа, для того, чтобы исключить растворение обрабатываемых деталей в алюминии. Процесс осуществляют при 700...800 °С в течение 45...90 мин. Толщина алитированного слоя достигает 0,2...0,35 мм.

Газовое алитирование проводят в закрытых ретортах газообразным хлористым алюминием, который при высоких температурах частично диссоциирует и насыщает сталь алюминием.

Алитированию подвергают детали газогенераторных машин, чехлы термопар, детали различных ковшей, клапаны и другие детали, работающие при высоких температурах.

Хромирование — поверхностное насыщение стали хромом в твердой, жидкой и газообразной средах. При хромировании стали в твердой среде применяют порошкообразную смесь, состоящую из 40...45% феррохрома, 45...50% шамота и 3...5% хлористого аммония. Хромирование проводят при 1100...1150 °С в течение 10...15 ч.

При жидком хромировании изделие нагревают до 900...1100 °С в ванне, состоящей из расплавленных хлористых солей бария, магния и кальция с добавкой 15...30% хлористого хрома или 15...25% феррохрома.

Более прогрессивно газовое хромирование стали. Изделия в этом случае нагревают до 950...1050 °С в атмосфере газообразного хлористого хрома. Толщина хромированного слоя составляет 0,15...0,20 мм.

Хромирование применяют для деталей паросилового оборудования, пароводяной арматуры, клапанов, вентилях, патрубков, а также деталей, работающих на износ в агрессивных средах, для декоративных целей.

Силицирование — поверхностное насыщение стали кремнием проводят для повышения износоустойчивости, улучшения коррозионной стойкости и кислотоупорности изделий.

При силицировании в твердой среде применяют порошкообразную смесь, состоящую из 60% ферросилиция, 38...39% глинозема или каолина и 1...2% хлористого аммония. Глубина силицированного слоя составляет 0,2...0,8 мм.

Газовое силицирование стали проводят при 950...1050 °С в атмосфере хлористого кремния в течение 2...4 ч. Толщина слоя составляет 0,5...1,24 мм. Твердость силицированного слоя достигает 200...300 единиц по Виккерсу.

Силицированию подвергают оборудование химической, бумажной, нефтяной промышленности (валики насосов, трубопроводы, арматура, гайки, болты и др.).

Борирование — поверхностное насыщение стали бором для придания износостойкости и высокой твердости, которая сохраняется до 950 °С.

Глава VIII. ЛЕГИРОВАННЫЕ СТАЛИ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

§ 1. Легирующие элементы в сплавах железа с углеродом

Как известно, углеродистые стали не обладают достаточно высокими механическими и физико-химическими свойствами и не отвечают требованиям, предъявляемым к металлам в современном машиностроении.

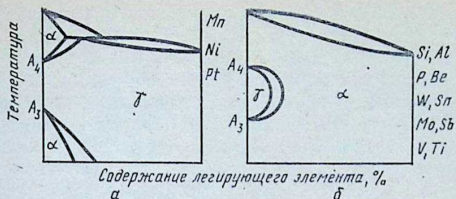


Рис. 5.32. Схемы диаграмм состояний железо — легирующий элемент:

а — первая группа (никель, марганец и др.) расширяет область аустенита; *б* — вторая группа (кремний, хром, алюминий и др.) расширяет область феррита.

Для получения необходимых свойств в сталь вводят легирующие элементы (Сг, Ni, Mo, V, Mn, Si, Ti, Al, В, Со и др.). Процесс этот называют *легированием*, а получаемые стали — *легированными*. Марганец и кремний, присутствующие в стали в качестве постоянных примесей, считаются легирующими элементами, если содержание каждого из них превышает 1%.

Легирующие элементы, введенные в сталь, могут образовывать с железом твердые растворы; растворяться в цементите, замещая атомы железа в решетке цементита, то есть образовывать легированный цементит или самостоятельные специальные карбиды; образовывать (при высоком содержании) с железом интерметаллидные соединения.

Все элементы, за исключением углерода, азота, водорода и отчасти бора, образуют с железом твердые растворы замещения. Растворяясь в железе, они оказывают существенное влияние на положение точек A_3 и A_4 , которые определяют температурную область существования α - и γ -железа.

Большинство элементов или повышают положение точки A_4 и снижают A_3 , расширяя тем самым область существования γ -модификации (рис. 5.32, *а*), или понижают положение A_4 и повышают A_3 , сужая область существования γ -модификации (рис. 5.32, *б*).

Из схематических диаграмм состояния железа — легирующий элемент (рис. 5.32) видно, что выше определенного содержания марганца, никеля и некоторых дру-

гих элементов γ -состояние стабильно существует от нормальной температуры до температуры плавления. Такие сплавы на основе железа называют *аустенитными*. При содержании ванадия, молибдена, кремния и других элементов свыше определенного предела устойчивым при всех температурах является α -состояние. Такие сплавы на основе железа называют *ферритными*. В отличие от других сплавов на основе железа аустенитные и ферритные сплавы не имеют превращений при нагревании и охлаждении.

Все легирующие элементы по отношению к углероду подразделяют на элементы, не образующие карбидов, и карбидообразующие. В периодической таблице Менделеева некарбидообразующие элементы стоят правее железа. К ним относят Ni, Co, Cu, Al и некоторые другие. К карбидообразующим элементам относят Mn, Cr, W, Mo, V, Ti, Ta и др. Менее устойчивые карбиды стоят в начале этого ряда. В стали, содержащей карбидообразующие элементы, образуются простые и сложные карбиды. Сложные карбиды возникают на основе цементита при замещении атомов основного металла легирующим элементом.

Легированные стали содержат три фазы: легированный феррит, легированный аустенит и легированный цементит (карбиды).

Легированный феррит — твердый раствор углерода и легирующего элемента в α -железе. Свойства легированного феррита изменяются в зависимости от содержания легирующих элементов.

Легированный аустенит — твердый раствор углерода и легирующего элемента в γ -железе. Прочность легированного аустенита по сравнению с нелегированным выше. Существенно отличаются его коррозионные, магнитные и электрические свойства.

Легированным называют цементит, в кристаллической решетке которого часть атомов железа замещена атомами легирующего элемента.

§ 2. Классификация и маркировка легированных сталей

Согласно существующим стандартам легированные стали классифицируют по химическому составу, микроструктуре и назначению.

По химическому составу легированные стали делят на тройные, содержащие один легирующий элемент (хромистые, никелевые, молибденовые и др.); четверные, содержащие два легирующих элемента (хромоникелевые, хромомарганцевые и др.), и сложные, содержащие три, четыре и более легирующих элементов (хромомарганцевоникелетитановая сталь и др.).

По количеству присутствующих легирующих элементов стали делятся на низколегированные с общим содержанием легирующих элементов до 2,5%; среднелегированные — 2,5...10% и высоколегированные, содержащие более 10% легирующих элементов.

Существует классификация легированных сталей по структуре в равновесном состоянии и после охлаждения на воздухе.

Легированные стали по структуре в условиях равновесия можно разделить на доэвтектоидные (в структуре избыточный феррит), эвтектоидные (перлитная структура), заэвтектоидные (в структуре избыточные карбиды) и ледебуритные стали (в структуре первичные карбиды, выделившиеся из жидкой стали). В литом виде избыточные карбиды совместно с аустенитом образуют эвтектику (ледебурит), который при обработке давлением распадается на обособленные карбиды и аустенит.

После охлаждения на воздухе образцов небольших размеров (диаметром 25 мм) стали делят на три класса: перлитный, мартенситный, аустенитный. Стали перлитного класса содержат сравнительно небольшое количество легирующих элементов (обычно не более 5...6%), мартенситного класса — больше, а стали аустенитного класса — еще больше (12...30% и более).

По назначению легированные стали делят на конструкционные, инструментальные и стали с особыми физическими свойствами.

Конструкционные стали подразделяют на стали, применяемые при обычных температурах, и стали, применяемые при повышенных температурах.

Инструментальные стали подразделяют на три класса: для режущего инструмента, для штампового инструмента и для измерительного инструмента. Стали с особыми свойствами обладают специальными физическими, химическими и механическими характеристиками.

Для обозначения марок легированных сталей в СССР принята буквенно-цифровая система, указывающая на

примерный состав стали. Каждый легирующий элемент обозначают прописной буквой: Г — марганец, С — кремний, Х — хром, Н — никель, М — молибден, Ф — ванадий, В — вольфрам, Т — титан, Ю — алюминий, Д — медь, Б — ниобий, К — кобальт, Р — бор, П — фосфор, Ц — церий, Ч — редкоземельные металлы.

Двухзначное число в начале марки означает содержание углерода в сотых долях процента (для конструкционных сталей), однозначное — содержание углерода в десятых долях процента (для инструментальных сталей). При содержании углерода в высоколегированных сталях менее 0,08% в начале марки ставят цифру 0. Цифру перед маркой не ставят в обозначениях многих инструментальных сталей, содержащих около 1% и более углерода, а также в марках высоколегированных сталей, если нижний предел содержания углерода не ограничен, а верхний предел составляет 0,09% и более.

Цифры, стоящие после буквы, указывают на примерное содержание данного легирующего элемента (при содержании элемента менее 1% цифра отсутствует).

Следовательно, сталь, содержащая 0,10...0,15% С и 1,3...1,7% Мп будет обозначаться 12Г2, а сталь с 0,28...0,35% С, 0,8...1,1% Сг, 0,9...1,2% Мп и 0,8...1,2% Si — 30ХГСА.

Букву А в конце обозначения марки ставят для того, чтобы показать, что в этой стали ограничено содержание серы и фосфора ($S < 0,025\%$; $P < 0,025\%$) и соблюдены все условия металлургического производства высококачественной стали.

В ряде случаев для сокращения числа знаков в обозначении сталей несколько отступают от точного соблюдения ГОСТа. Особенно это относится к сложнoleгированным сталям. Например, в инструментальных сталях, имеющих более 1% углерода, цифры, обозначающие его содержание, полностью опускают. Так, инструментальную сталь с 1,45...1,70% С, 11...12,5 Сг и 0,5...0,8% Мо обозначают Х12М.

Некоторые подгруппы сталей по стандарту имеют особую маркировку. Магнитные стали и сплавы маркируют четырех- и пятизначными цифрами. Марки быстрорежущих сталей начинаются с буквы Р, шарикоподшипниковых — Ш, а если буква Ш стоит в конце марки, она указывает способ переплава — электрошлаковый.

§ 3. Конструкционные легированные стали

Конструкционные легированные стали имеют более высокие механические свойства как до, так и после термической обработки; они легко закаливаются и лучше прокаливаются в больших сечениях, чем углеродистые стали.

Низколегированную сталь применяют для изготовления сварных конструкций, трубопроводов и элементов строительных конструкций. Основными легирующими элементами этой группы сталей являются марганец и кремний. Во избежание значительного падения ударной вязкости их вводят в количестве не более 2%. Содержание углерода не превышает 0,1...0,2%. Все низколегированные стали содержат небольшие (0,3...0,5%) количества хрома, никеля и меди.

Легированную сталь обязательно подвергают термической или химико-термической обработке. В качестве химико-термической обработки в основном применяют цементацию. В соответствии с этим легированную сталь разделяют на цементуемую и улучшаемую. К цементуемой относят малоуглеродистую легированную сталь (от 0,10...0,25% углерода); улучшаемая сталь может содержать до 0,5% углерода.

Основным легирующим элементом является хром (около 2%), значительно повышающий прочностные характеристики термообработанной стали. Будучи более сильным карбидообразующим элементом, чем марганец, хром активно повышает твердость и прочность отпущенной стали, практически не снижая пластичности. Аналогично действуют и такие карбидообразующие элементы, как молибден, вольфрам, ванадий и др. Однако эти металлы дороже хрома. Их обычно вводят не столько для повышения прочностных характеристик стали, сколько из-за их специфических свойств. Так, молибден и вольфрам устраняют отпускную хрупкость, которой подвержены хромистые и хромоникелевые стали.

Для получения высоких механических свойств по всему сечению крупногабаритных деталей в легированную сталь вводят марганец и никель, интенсивно увеличивающие прокаливаемость стали. Что касается прочностных свойств, то марганец и никель значительно меньше влияют на них, чем хром, молибден, вольфрам, ванадий и др.

Помимо воздействия на механические свойства, отдельные элементы несут и другие функции. Никель увеличивает прокаливаемость, молибден уничтожает отпускную хрупкость, алюминий повышает твердость азотированного слоя.

Легированную сталь подразделяют на 14 групп, названия которых соответствуют содержащимся в них элементам: хромистая, марганцовистая, хромомарганцовистая и т. д. Рассмотрим некоторые из них, наиболее широко применяемые в машиностроении.

Хромистая сталь имеет более высокие прочностные характеристики, чем углеродистая (особенно после термической обработки). Цементуемые хромистые стали 15X, 15XA, 15XP, 15XPA, 20X, 20XP применяют для изготовления износостойких деталей, работающих при средних скоростях и удельных давлениях (пальцы, оси, толкатели, плунжеры, шестерни и др.). Улучшаемые стали 30X, 30XPA, 35X, 35XPA, 38XA, 40X, 40XP, 45XC, 45X, 50X применяют для изготовления валов, осей, шестерен, втулок, пальцев. Стали 38XA, 40X, 40XP идут на изготовление муфт, кривошипов, фрикционных дисков, роторов турбокомпрессоров и т. п. Хотя прокаливаемость хромистой стали больше, чем углеродистой, она все же не очень велика (около 20 мм при закалке в масле), поэтому хромистую сталь применяют в основном для изготовления деталей небольших размеров. Стали, содержащие бор, имеют большую прокаливаемость. Стали 45X и 50X склонны к трещинообразованию при закалке в воде.

Марганцовистую сталь выпускают следующих марок: 10Г2, 35Г2, 40Г2, 25Г2 и 50Г2. Сталь 10Г2, у которой высокая пластичность и хорошая свариваемость, применяют для изготовления змеевиков, фланцев, штуцеров, пучков труб и крепежных деталей. Она может работать при низких температурах (до -70°C). Стали 35Г2, 40Г2, 50Г2 имеют повышенную износостойкость и служат для изготовления осей, цапф, коленчатых валов, штоков, шестерен и т. п. Основная термическая обработка этих сталей — улучшение. Марганцовистая сталь хорошо обрабатывается резанием и штамповкой в холодном состоянии. Однако после закалки эти стали склонны к короблению и образованию трещин. При добавлении хрома и титана склонность марганцовистой стали к таким дефектам существенно снижается.

Хромомарганцовистая сталь марок 18ХГ, 18ХГТ, 30ХГТ, 40ХГР, 35ХГ2 служит для изготовления ответственных деталей, работающих при больших давлениях, скоростях и ударных нагрузках. Из сталей 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХГР, 30ХГТ делают пальцы, шкворни, втулки, шестерни, червячные валы и др. Стали 40ХГ, 40ХГР, 35ХГ2 идут на изготовление износостойких деталей, работающих при средних давлениях и скоростях (кулаки, шестерочки, пальцы, валы и др.). Стали 18ХГ, 18ХГТ, 20ХГР, 30ХГТ применяют после цементации, а стали 40ХГ, 40ХГР, 35ХГ2 — после улучшения закалки т. в. ч. Хромомарганцевые стали, как более дешевые, применяют вместо дорогих хромоникелевых.

Хромокремнемарганцевые стали 25ХГСА, 30ХГСА, 30ХГСНА, 35ХГСА и 20ХГСА обладают высокой прокаливаемостью, хорошо свариваются и удовлетворительно обрабатываются режущим инструментом. Из них изготовляют износостойкие детали машин и сварные конструкции. Термическая обработка заключается в закалке и низком или высоком отпуске.

Хромоникелевые стали 40ХН, 45ХН, 50ХН и 30ХНЗА, как и другие более сложно легированные стали, содержащие никель, применяют для изготовления сильно нагруженных деталей больших размеров, поскольку никель значительно увеличивает прокаливаемость стали. Никель — один из немногих легирующих элементов, который, повышая прочность стали, не снижает ее вязкости при

Легированную сталь специального назначения применяют для изготовления рессор, пружин, шарикоподшипников, труб и других изделий.

Рессорно-пружинная и шарикоподшипниковая стали должны иметь в термически обработанном состоянии высокие пределы текучести, упругости и выносливости, поэтому они содержат значительные количества углерода. Содержание углерода в рессорно-пружинной стали не должно быть менее 0,5%, а в шарикоподшипниковой — 1%.

Основными легирующими элементами рессорно-пружинных сталей (55ГС, 55С2, 50ХГА, 50ХФА и др.) являются кремний, марганец, хром и ванадий. Для получения достаточно высоких механических свойств рессорно-пружинные стали закалывают в масле и дают рессорно-пружинные стали имеют при твердости HRC39...44.

Для изготовления подшипников качения применяют высокоуглеродистые хромистые стали ШХ6, ШХ9, ШХ15, ШХ15СГ. Сталь ШХ15СГ обладает повышенной прокаливаемостью, поэтому из нее изготавливают крупногабаритные подшипники. После термической обработки стали этой группы должен иметь твердость порядка HRC62...65.

§ 4. Электротехнические металлы и сплавы

Проводниковые металлы и сплавы с малым удельным сопротивлением должны обладать коррозионной стойкостью, механической прочностью, способностью обрабатываться давлением в холодном и горячем состояниях, свариваться и паяться. Этим требованиям в определенной степени удовлетворяют медь и ее сплавы, алюминий, сталь, свинец, серебро, золото, платина и некоторые другие металлы.

Медь — один из главных проводниковых материалов. Отожженная медь марки ММ идет на изготовление изолированных обмоточных и монтажных проводов. Наклепанную медь марки МТ используют для неизолированных проводов воздушных линий, шин электроустановок, коллекторов электромашин.

Из медных сплавов (бронзы и латуни) делают провода повышенной прочности, пружины, щеткодержатели, контактные детали, зажимы и крепежные детали. Для этих целей используют латуни марок Л63, Л68, фосфористую бронзу марки Бр. ОФ7-0,2 и некоторые другие.

Алюминий — распространенный проводниковый материал. Из отожженной алюминиевой проволоки марки АМ делают изолированные обмоточные провода. Нетожженную алюминиевую проволоку марки АТ используют для кабелей воздушных линий электропередачи и шин, для электрических аппаратов и распределительных установок. Недостатками алюминия являются низкие прочность и свариваемость, он плохо поддается пайке.

Железо и сталь — наиболее доступные и дешевые проводниковые материалы, обладающие высокими механическими свойствами. Однако их применение ограничено низкой коррозионной стойкостью и повышенным удельным сопротивлением по сравнению с медью и алюминием. Железо и сталь — магнитные материалы, поэтому ток из средней части провода вытесняется к его поверхности (поверхностный эффект). Для снижения элек-

трического сопротивления и поверхностного эффекта используют измельчение зерен стали и наклеп проволоки. Для изготовления проволоки используют малоуглеродистую сталь, которую покрывают тонким слоем цинка (оцинковывают) для защиты от коррозии.

Широкое применение стальная оцинкованная проволока находит в строительстве воздушных линий связи, а также линий электропередач небольших мощностей. Стальную проволоку широко используют в качестве сердечников биметаллических сталепружинных и сталемедных проводов.

Свинец широко применяют для изготовления защитных оболочек кабелей, легкоплавких вставок предохранителей, защитных экранов в рентгеновских установках и пластин в кислотных аккумуляторах. Свинец обладает невысокой стойкостью к растворам извести, бетона и гниющим органическим соединениям.

Платина и серебро обладают высокой пластичностью и коррозионной стойкостью. Из них можно изготовить проволоку диаметром 0,002 мм. Из платиновой проволоки делают электронагревательные элементы лабораторных печей, подвески и струны в точных электроизмерительных приборах, термопары. Из серебра и платины изготовляют контакты для включающих аппаратов малой мощности.

Вольфрам и молибден используют для изготовления спиралей накаливания, поддерживающих крючков, петьель и катодов в электровакуумных приборах, для размыкающих контактов в электрических аппаратах.

Ртуть сохраняет свое жидкое состояние до -39°C , стойка к окислению. Медь, цинк, свинец, никель, олово, серебро и золото растворяются в ртути. Ртуть применяют в качестве жидких контактов в специальных реле, выключателях и ртутных выпрямителях.

Проводниковые материалы с большим удельным сопротивлением должны обладать стойкостью к окислению при высокой температуре, малым температурным коэффициентом сопротивления. К ним относят медноникелевые (манганин и константан), никелевые и жаропрочные сплавы.

Манганин (МНМц3-12) содержит $\sim 3\%$ Ni, 12% Mn, остальное медь. Сплав обладает высоким электросопротивлением при малом температурном коэффициенте сопротивления. Манганиновую проволоку применяют для

обмоток катушек сопротивления различных приборов, работающих при температуре до 100 °С, в измерительных приборах.

Константан (МНМц40-1,5) содержит ~40% Ni, 1,5% Mn, остальное медь. Его применяют в виде проволоки для термопар и реостатов высокого сопротивления, работающих при температуре до 500 °С.

Никелевые сплавы с марганцем (НМц2,5 и НМц5) применяют для изготовления стержней автомобильных свечей и радиоламп.

Жаростойкие сплавы используют в электронагревательных приборах в печах сопротивления с рабочей температурой до 1200 °С. К ним относят хромоникелевые сплавы (нихромы) — Х20Н80, сплавы на основе никеля, хрома и железа (ферронихромы) — Х15Н60, Х25Н20, тройные сплавы железа, хрома и алюминия (фехрали, хромали) — Х13Ю4, Х17Ю5, ОХ25Ю5. Перечисленные сплавы представляют собой твердые растворы. При нагревании на их поверхности образуется плотная защитная пленка из окиси хрома (Cr_2O_3) и закиси никеля (NiO), которая надежно предохраняет сплав от окисления.

Магнитные металлы и сплавы обладают ферромагнетизмом. Это сплавы на основе железа, кобальта и никеля. По свойствам магнитные металлы и сплавы подразделяют на магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие стали используют для изготовления сердечников, трансформаторов, генераторов, электромоторов и электромагнитов (динамная и трансформаторная стали). Эти стали должны обладать высокой магнитной проницаемостью, малыми потерями на гистерезис и вихревые токи. Коэрцитивная сила этих сталей не должна быть большой. К магнитомягким относятся стали марок 1521 (Э44), 1413 (Э33), 1312 (Э22), 1212 (Э12) и др.

Магнитотвердые стали необходимы для изготовления постоянных магнитов, которые устанавливают в ряде измерительных приборов, радиоаппаратуре и т. д. Эти стали должны обладать большой коэрцитивной силой и остаточной индукцией. Постоянные магниты делают из сложных сталей, легированных кобальтом, вольфрамом, хромом, никелем, медью и алюминием. К ним относят стали марок ЕХ3, ЕХ9К15М2 и др.

Высоких магнитных свойств и их стабильности в магнитотвердых сталях достигают не только введением определенных количеств перечисленных легирующих элементов, но и специальной термической обработкой. Сначала проводят нормализацию при 1100...1250 °С, затем нагрев под закалку до 830...850 °С с охлаждением в масле и, наконец, отпуск при 100 °С с охлаждением на воздухе.

Стали с большим содержанием никеля (35...44%) и малым содержанием углерода (до 0,35%) имеют аустенитную структуру, что обеспечивает низкий коэффициент их теплового расширения при нагреве.

Немагнитные стали и чугуны с высоким содержанием никеля и марганца используют при изготовлении электрических машин.

§ 5. Износостойкая аустенитная сталь

Для изготовления деталей, работающих в условиях трения скольжения, высоких удельных давлений и ударов (звенья гусениц тракторов и других гусеничных машин, щеки дробилок, зубья черпаков землеройных машин, крестовины железнодорожных и трамвайных путей и др.), применяют высокомарганцовистую аустенитную сталь 110Г13Л, содержащую 1...1,5% С, 11...15% Мп. Все детали из этой стали изготовляют отливкой в металлические формы (кокили). Структура отливок состоит из аустенита и карбидов, располагающихся по границам зерен аустенита. Такое расположение карбидов снижает прочность и вязкость стали, поэтому отливки из стали 110Г13Л подвергают закалке при 1050...1150 °С с охлаждением в воде. При нагреве до такой температуры карбиды растворяются в аустените, а быстрое охлаждение препятствует их обратному выделению. В результате закалки сталь имеет структуру пересыщенного углеродом аустенита.

Сталь 110Г13Л очень сильно упрочняется при наклепе. Твердость после наклепа составляет НВ500...550. Если детали работают в условиях значительных давлений и ударных нагрузок, то сопротивление износу повышается. Упрочнение и износостойкость объясняются тем, что при наклепе в поверхностном слое происходит мартенситное превращение. Если же при эксплуатации отсутствуют давление и вызываемый им наклеп, то сталь

не обнаруживает повышенной износостойкости. Сталь 110Г13Л не обрабатывают резанием, так как при этом возникает сильный наклеп.

§ 6. Нержавеющие стали

Коррозия — разрушение металлов под воздействием окружающей среды, приводит к невозвратной потере металла и приносит огромные убытки, поэтому борьба с коррозией является очень важной задачей.

Различают химическую коррозию, протекающую при воздействии на металл газов (газовая коррозия) и неэлектролитов (нефть и ее производные); электрохимическую коррозию, вызываемую действием электролитов (кислоты, щелочи и соли). К электрохимической коррозии относят атмосферную и почвенную коррозию.

Сталь, обладающую стойкостью против газовой коррозии (окалинообразования) при температурах выше 550 °С, называют *окалиностойкой* или *жаростойкой*. Сталь, обладающую стойкостью против электрохимической коррозии, называют *коррозионностойкой* или *неражавеющей*.

Основной способ, повышающий устойчивость стали против коррозии, — введение в нее элементов, образующих на поверхности изделия защитные пленки, прочно связанные с основным металлом и предупреждающие контакт между металлом и наружной агрессивной средой, а также увеличивающие химический потенциал стали в разных агрессивных средах.

Углеродистые и низколегированные стали неустойчивы против коррозии. Антикоррозионными свойствами обладают стали, содержащие большое количество хрома (хромистые нержавеющие стали) или хрома и никеля (хромоникелевые нержавеющие стали). Эти стали должны быть однофазными (ферритными, аустенитными, мартенситными).

Хромистые нержавеющие стали содержат не менее 12% хрома. При меньшем содержании хрома сталь неспособна сопротивляться коррозии. Эти стали имеют одинаковое количество хрома (12...14%), но различное количество углерода (0,09...0,44%), что определяет их структуру, термическую обработку и применение.

Для получения наилучших антикоррозионных и механических свойств стали 12Х13 (мартенситно-ферритный

класс) и 20X13 (мартенситный класс) подвергают закалке в масле с 1000...1050 °С с последующим отпуском при 650...700 °С (HB200...220) или отжигу при 870...900 °С (HB140...180).

Из этих сталей делают детали машин, работающих в слабокоррозионных средах при нормальных температурах (атмосферные осадки, водные растворы солей органических кислот).

При нагреве сталей 30X13 и 40X13 (мартенситный класс) получают аустенитную структуру. Термическая обработка этих сталей состоит из закалки с 1000...1050 °С в масле с последующим отпуском при 200...300 °С (HRC48...53). Стали 30X13 и 40X13 коррозионно-стойки к среде разных пищевых продуктов, растворам азотной кислоты. Из них делают хирургический инструмент, пружины, предметы домашнего обихода.

Стали 12X17 и 15X28 (ферритный класс) имеют микроструктуру феррита с небольшим количеством карбидов хрома. Эти стали стойки против коррозии в различных средах, в том числе в азотной и уксусной кислотах. Их применяют для оборудования азотокислых заводов и заводов пищевой промышленности.

Хромоникелевые нержавеющие стали (например, 12X18H9) содержат большое количество хрома и никеля и относятся к аустенитному классу. Кроме аустенита, эти стали содержат карбиды. Для получения однофазной структуры аустенита сталь закаливают в воде от 1050...1100 °С. При этом получают наиболее высокую коррозионную стойкость, но сравнительно невысокую прочность. Для повышения прочности эти стали подвергают холодной деформации.

Хромоникелевые нержавеющие стали имеют большую коррозионную стойкость, чем хромистые нержавеющие стали, и их очень широко применяют в химической, нефтяной и пищевой промышленности, в автостроении, в строительстве.

Особую группу представляют аустенитно-мартенситные нержавеющие стали (например, сталь 09X15H8Ю), которые наряду с хорошей устойчивостью против атмосферной коррозии обладают высокими механическими свойствами.

Аустенито-мартенситные стали для улучшения механических свойств подвергают сложной термической обработке. Сталь закаливают от 975 °С с получением аус-

тенистой структуры, которая обладает достаточно высокой пластичностью и может быть подвергнута пластической деформации и обработке резанием, затем проводят обработку холодом при температурах $-50...75^{\circ}\text{C}$ для частичного перевода аустенита (около 40%) в мартенсит. После этого делают отпуск при $450...500^{\circ}\text{C}$.

Механические свойства стали зависят от количества образовавшегося мартенсита, которое можно регулировать температурой закалки и обработкой холодом. Если количество мартенсита превышает 40%, то пластичность стали заметно уменьшается, а прочность возрастает.

§ 7. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами

В качестве материала с определенным коэффициентом термического расширения применяют железоникелевые сплавы, содержащие много никеля. Для эталонов длины и прецизионных механизмов используют сплав инвар (36Н), в котором 36% Ni. Сплав инвар почти не расширяется в интервале температур $0...100^{\circ}\text{C}$. Его применяют для деталей точных приборов, которые не должны изменять своих размеров с изменением температуры.

Для впаев в стеклянные вакуумные трубки применяют сплав ковар (29 НК), содержащий 29% Ni и 18% Co. Коэффициент линейного расширения ковара близок к коэффициенту стекла.

К группе сплавов с особыми упругими свойствами относят сплавы с низким температурным коэффициентом модуля упругости. Из них изготавливают пружины точных приборов и другие упругие элементы, которые должны иметь постоянные модули упругости в определенном интервале температур. Этим требованиям удовлетворяют сплавы типа элинвар, например сплав 42НХТЮ, содержащий 42% Ni, 5,5% Cr, 2,7% Ti, 0,75% Al.

После закалки с 950°C и охлаждения в воде сплав имеет аустенитную структуру, обладает сравнительно низкой прочностью и высокой пластичностью. После старения при 600°C прочность возрастает, а пластичность снижается. Элинвар применяют в виде тонкой ленты (0,1...0,2 мм) и проволоки диаметром 0,3...5 мм.

§ 1. Стали для режущих инструментов

К режущим инструментам относят резцы, сверла, метчики, фрезы, протяжки и т. п. В связи с условиями работы инструмента к инструментальным сталям предъявляются определенные требования. Сталь для режущего инструмента должна обладать высокой твердостью, превышающей твердость обрабатываемого материала, износостойкостью, теплостойкостью (краснотой), то есть способностью сохранять при нагреве рабочей кромки, возникающем в работе, структуру и свойства, необходимые для резания.

Режущий инструмент изготавливают из углеродистых, легированных и быстрорежущих сталей. Быстрорежущие стали являются высоколегированными сталями, однако они составляют особую группу инструментальных сталей.

Углеродистые инструментальные стали марок У7 (У7А)...У13 (У13А) и другие применяют для изготовления инструмента, не подвергающемуся резким и сильным ударам (сверла, плашки, метчики, развертки, резцы, фрезы, ножовочные полотна, напильники, шаберы).

Марки этих сталей расшифровывают так: буква У указывает на отношение их к группе углеродистых инструментальных сталей, а цифры показывают содержание углерода в десятых долях процента. В обозначениях марок высококачественных сталей (в отличие от качественных) ставят букву А.

Высококачественные стали содержат более низкое количество серы (до 0,02%) и фосфора (до 0,03%), имеют меньше неметаллических включений, обладают повышенными механическими свойствами.

Углеродистые инструментальные стали относят к заэвтектоидным сталям. Перед обработкой их резанием они должны иметь структуру зернистого перлита (цементитная сетка не допускается), поэтому заэвтектоидную сталь отжигают по одному из режимов отжига на зернистый перлит.

Достоинства углеродистых инструментальных сталей — дешевизна, невысокая твердость (НВ166...192) и хорошая обрабатываемость резанием и давлением в отожженном состоянии.

Температура закалки углеродистых инструментальных сталей должна быть 780...800 °С (выше A_{c1} на 50...70°, но ниже A_{cm}), чтобы в результате закалки сталь получила мартенситную структуру и сохранила мелкое зерно и нерастворенные частицы вторичного цементита (неполная закалка). Для снятия напряжений и сохранения высокой твердости (HRC60...63) инструмент подвергают отпуску при 150...170 °С.

Углеродистые стали используют для инструмента, работающего с малыми скоростями резания, так как при нагреве выше 190...200 °С его твердость сильно падает.

Легированные инструментальные стали менее чувствительны к перегреву, имеют большую прокаливаемость, лучшую закаливаемость и позволяют проводить охлаждение при закалке в масле, что уменьшает деформацию и коробление инструмента. Примерное назначение этих сталей следующее:

9ХФ — для круглых и ленточных пил, для ножей, используемых при холодной резке металла;

11Х — для метчиков и другого режущего инструмента диаметром до 30 мм, закаливаемого в горячих средах;

13Х — для бритвенных ножей и лезвий, острого хирургического инструмента, шаберов, гравильного инструмента;

9ХС — для сверл, разверток, метчиков, плашек, фрез;

ХВГ и 9ХВГ — для режущего инструмента, резьбовых калибров, протяжек, плашек, длинных метчиков и разверток;

ХВСГ — круглых плашек, разверток, крупных протяжек и другого режущего инструмента.

Основной легирующий элемент в сталях Х, 9ХС, ХВГ — хром. Сталь Х легирована только хромом (1,3...1,65%). Повышенное содержание хрома значительно увеличивает прокаливаемость. Сталь Х прокаливается насквозь в сечении до 25 мм (твердость в середине HRC60), а сталь У10 — только в сечении до 5 мм. Сталь Х применяют для токарных, строгальных и долбежных резцов. Сталь 9ХС, кроме хрома, легирована кремнием. По сравнению со сталью Х она имеет большую прокаливаемость (до 35 мм), повышенную теплоустойчивость (до 250...260 °С), лучшие режущие свойства, более равномерное распределение карбидов. Сталь ХВГ имеет прокаливаемость до 45 мм, а сталь ХВСГ — до 80 мм.

Быстрорежущие стали широко применяют для изготовления разнообразного режущего инструмента, работающего при высоких скоростях резания, в тяжелых условиях. Качество резов, сверл и других инструментов зависит от качества быстрорежущей стали, тщательности изготовления инструмента и от его термической обработки. Быстрорежущие стали являются высоко- и сложнелегированными сталями (табл. 9).

9. Химический состав наиболее распространенных быстрорежущих сталей, %

Марка стали	C	Cr	W	V	Mo
P18	0,7...0,8	3,8...4,4	17,0...18,5	1,0...1,4	До 1
P12	0,8...0,9	3,1...3,6	12,0...13,0	1,5...1,9	До 1
P6M3	0,85...0,95	3,0...3,5	3,5...6,5	2,0...2,5	3...3,6
P6M5	0,80...0,88	3,8...4,4	5,5...6,5	1,7...2,1	5...5,5

Быстрорежущие стали имеют высокую теплостойкость (до 615...635 °С), поэтому их применение позволяет повысить скорость резания в 2...4 раза, стойкость инструмента — в 10...30 раз по сравнению с углеродистыми инструментальными сталями.

Быстрорежущая сталь принадлежит к ледебуритному классу легированных сталей. В литом состоянии структура быстрорежущей стали состоит из ледебуритной эвтектики, имеющей «скелетообразный» вид, и продуктов распада аустенита. Литая сталь имеет три типа карбидов: первичные (ледебуритная эвтектика); вторичные, выделившиеся при охлаждении из аустенита, и эвтектондные, образовавшиеся в результате перлитного превращения.

Для разрушения неблагоприятной формы карбидов (ледебуритной эвтектики) и устранения хрупкости литую быстрорежущую сталь подвергают горячей обработке давлением (прокатка,ковка), а затем отжигу при 860...880 °С. После обработки давлением и отжига структура стали состоит из сорбитообразного перлита и избыточных карбидов с твердостью HB207...255 (рис. XIII, а).

Высокие режущие свойства быстрорежущая сталь приобретает после соответствующей термической обработки (рис. 5.33). При закалке стали из-за ее плохой

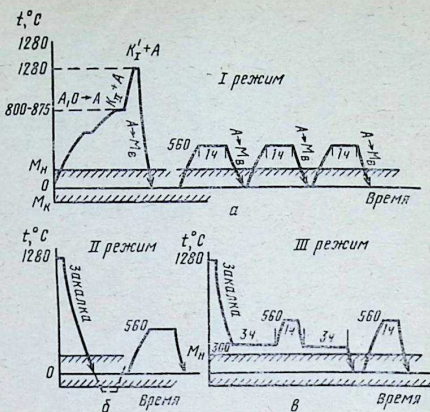


Рис. 5.33. Графики термической обработки стали P18:

а — закалка и трехкратный отпуск; б — закалка, обработка холодом и однократный отпуск; в — закалка и отпуск с интервалом в 3 ч.

теплопроводности нагрев до 850°C должен быть очень медленным во избежание возникновения термических напряжений и трещин. После нагрева до 850°C сталь выдерживают при этой температуре. Нагрев с 850 до 1300°C , когда сталь уже находится в достаточно пластическом состоянии, должен быть очень быстрым, выдержка при температуре нагрева кратковременная, чтобы предотвратить обезуглероживание поверхности инструмента. Высокие температуры нагрева при закалке стали P18 ($1260\dots 1300^{\circ}\text{C}$) необходимы для возможно более полного растворения вторичных карбидов в аустените. После нагрева до указанных температур и надлежащей выдержки инструмент охлаждают в масле или на воздухе.

В результате закалки получают структуру, состоящую из мартенсита, остаточного аустенита и сложных карбидов с твердостью HRC61...63 (рис. XIII, б).

Для получения необходимых свойств закаленный инструмент подвергают высокому отпуску при $560^{\circ}\pm$

$\pm 10^{\circ}\text{C}$. При этом из остаточного аустенита выделяются карбиды вольфрама и ванадия, что уменьшает его легированность, поэтому при последующем охлаждении он претерпевает мартенситное превращение (при температурах ниже 150°C). Для некоторых инструментов широко применяют ступенчатую закалку в расплавленных солях при $500\text{...}550^{\circ}\text{C}$. Это способствует уменьшению деформации инструмента.

Однократный отпуск стали P18 не обеспечивает перевода всего остаточного аустенита в мартенсит, поэтому для получения наилучших режущих свойств применяют многократный отпуск (чаще всего трехкратный) с выдержкой $45\text{...}60$ мин (рис. 5.33, а). В некоторых случаях возможно применение режима III (рис. 5.33, в). Обработка быстрорежущей закаленной стали холодом при -80°C , во время которой значительная часть остаточного аустенита переходит в мартенсит, позволяет ограничиться однократным отпуском (рис. 5.33, б). После указанной термообработки структура состоит из мартенсита и карбидов (рис. XIII, в). Для улучшения режущих свойств инструмент из быстрорежущей стали после отпуска иногда подвергают низкотемпературному цианированию, в результате чего на поверхности инструмента образуется тонкий слой ($0,02\text{...}0,07$ мм), имеющий твердость HV1000...1100 и повышенную теплостойкость (650°C).

§ 2. Стали для измерительных инструментов

Измерительные инструменты должны иметь высокую твердость, износостойкость и сохранять свои размеры во время эксплуатации. Для их изготовления используют легированные стали X, 12X1, ХГ, Х9, Х12ФМ, Х12Ф1; углеродистые инструментальные стали У8...У12; простую углеродистую сталь 20, подвергаемую цементации; сталь 38Х2ЮА, подвергаемую азотированию. Эти стали после закалки и низкого отпуска ($150\text{...}160^{\circ}\text{C}$) приобретают высокую твердость.

В закаленных высокоуглеродистых сталях при нормальной температуре продолжительное время идет процесс старения, который заключается в частичном распаде мартенсита и превращении некоторого количества остаточного аустенита в мартенсит. Эти превращения

вызывают небольшое изменение объема и линейных размеров изделий, недопустимое для измерительных инструментов.

Для предупреждения старения измерительные инструменты после закалки нередко обрабатывают холодом при $-65...70^{\circ}\text{C}$ для более полного превращения аустенита, а затем в течение 12...24 ч проводят отпуск при $120...130^{\circ}\text{C}$. Твердость после указанной обработки HRC62...64.

§ 3. Штамповые стали

Штамповые стали делят на стали для инструментов холодного и горячего деформирования.

Стали для инструментов холодного деформирования. Штампы небольших размеров (диаметром 25...30 мм), простой формы, работающие в легких условиях, изготавливают из углеродистых инструментальных сталей У10А, У11А, У12А. Они сохраняют вязкую сердцевину из-за пониженной прокаливаемости, что обеспечивает хорошую стойкость инструмента к динамическим нагрузкам при штамповке.

Штампы сечением 75...100 мм более сложной формы и для более тяжелых условий работы изготавливают из сталей Х, ХВГ, 7ХГ2ВМ. Закалка этих сталей с охлаждением в масле и горячих средах уменьшает их склонность к деформации.

Для изготовления очень крупных штампов, особенно испытывающих повышенный износ (сложные дыропрошивные матрицы и пуансоны, матрицы для глубокой высадки листового металла, формовочные матрицы сложных форм), применяют стали Х12М и Х12Ф1. В этих сталях содержание карбидов после отжига достигает 13...16%, что обеспечивает высокую износостойкость деталей.

Штампы из стали Х12М закалывают с температуры $1000...1050^{\circ}\text{C}$, а из стали Х12Ф1 — с $1040...1070^{\circ}\text{C}$ и отпускают при $150...170^{\circ}\text{C}$. После такой обработки инструмент имеет твердость HRC60...63.

Для инструмента, подвергающегося в работе большим ударным нагрузкам (пневматические зубила, обжимки, ножницы для холодной резки металла), применяют стали 4ХС, 6ХС, 4ХВ2С, которые содержат 0,4...0,6% углерода и имеют повышенную вязкость. Эти стали

закалывают в масле с температуры 840...900 °С и отпускают при 240...270 °С до твердости HRC50...55.

Стали для инструментов горячего деформирования. Стали для штампов, деформирующих металл в горячем состоянии, должны иметь высокие механические свойства при повышенных температурах и выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования трещин. Кроме того, эти стали должны обладать высокой прокаливаемостью и быть чувствительными к отпускной хрупкости.

Для молотовых штампов, подверженных ударным нагрузкам, применяют стали 5ХНМ и 5ХГМ. Для них характерна глубокая прокаливаемость (до 200...300 мм). Температура их закалки 820...860 °С, охлаждение в масле. Стали отпускают при 500...580 °С для получения сорбитной структуры с повышенной вязкостью. Твердость после отпуска HRC35...45.

Для вытяжных и высадочных штампов, а также пресс-форм для литья металлов под давлением применяют стали повышенной прокаливаемости (3Х2В8Ф, 4Х5МФ1С, 4ХЗВ2Ф2М2 и др.). После закалки с 1070 °С в масле и отпуска при 610...620 °С (сталь 4Х5МФ1С) получают твердость HRC45.

Глава X. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ

§ 1. Медь и ее сплавы

Медь — тяжелый цветной металл, его плотность — 8,94 т/м³, температура плавления — 1083 °С, кипения — 2360 °С, кристаллическая решетка — гранецентрированный куб. Механические свойства чистой меди после отжига: $\sigma_{\text{в}} = 220...240$ Н/см², HB45, $\delta = 50\%$, $\psi = 75\%$. В чистом виде медь применяют для электротехнических целей (провода, кабели, шины и т. п.). Согласно ГОСТу техническую медь делят на десять марок: М00 (99,99% Cu), М0 (99,95% Cu), М1 (99,90% Cu), М2 (99,70% Cu), М3 (99,50% Cu), М4 (99,0% Cu), М0б, М1р, М2р, М3р.

Медь устойчива к воздействию воздуха и воды, но окисляется в сернистых газах и аммиаке. Медь легко обрабатывать давлением, но плохо резанием. Она имеет невысокие литейные свойства из-за большой усадки.

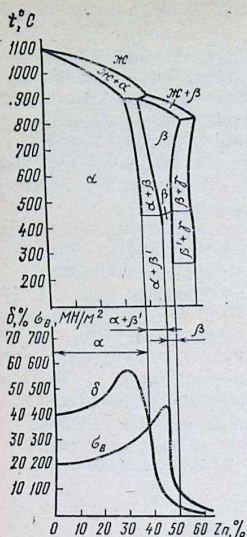


Рис. 5.34. Диаграмма состояния системы Cu—Zn в сочетании с графиком изменения механических свойств сплавов и микроструктуры латуни.

содержании цинка свыше 45% латунь теряет прочность и пластичность. Из таких сплавов детали машин не изготавливают. Латуни, содержащие до 10% цинка, называют томпаками, а содержащие 10...20% — полутомпаками.

Различают латуни простые (двойные), состоящие только из меди и цинка, и сложные (легированные), которые, кроме меди и цинка, содержат один или несколько легирующих элементов. Некоторые из них (алюминий, никель, железо) добавляют в латунь для улучшения ее механических свойств, другие (олово, марганец) — для повышения коррозионной стойкости. Сви-

Структура меди характеризуется наличием двойников (рис. XIV).

Для изготовления деталей машин чистую медь используют редко из-за ее сравнительно невысоких механических и некоторых технологических свойств. Широко применяют сплавы на основе меди (латуни и бронзы), которые отличаются более высокой прочностью, лучшей обрабатываемостью и лучшими литейными свойствами.

Латуни — это сплавы меди с цинком (рис. 5.34). Строение, а следовательно, и свойства латуней зависят от содержания в них цинка. Если в сплаве цинка менее 39%, то латунь имеет однофазную структуру (α -латунь) и отличается мягкостью и пластичностью, микроструктура ее подобна микроструктуре меди, но более мелкозернистая. Латунь, содержащая 40...45% цинка, имеет двухфазную структуру (рис. XV). Она более твердая и хрупкая. Максимальной пластичностью обладает латунь, содержащая 30% цинка. При

нец (1...3%) добавляют для улучшения резания. При обработке латуни, не содержащей свинец, образуется вьющаяся (сливная) стружка, а при обработке латуни со свинцом получается сыпучая стружка.

Обыкновенные латуни обозначают буквой Л и двухзначными цифрами, показывающими содержание меди в процентах. Существует семь марок обыкновенных α -латуней (Л99, Л90, Л85, Л80, Л70, Л68, Л62). В специальных латунях за буквой Л следуют (в порядке убывания) буквенное обозначение основных легирующих элементов и цифры, показывающие содержание меди и этих элементов. Например, обыкновенная латунь Л62 содержит 62% меди, 38% цинка, а ЛС59-1 содержит 59% меди, 1% свинца и 40% цинка. Приняты следующие буквенные обозначения легирующих элементов: А — алюминий, Б — бериллий, Ж — железо, К — кремний, Мц — марганец, Мг — магний, Н — никель, О — олово, С — свинец, Ц — цинк, Х — хром.

Свинцовистые латуни марок ЛС74-3, ЛС60-1, ЛЖС-58-1-1 обладают хорошими механическими свойствами, очень охорошо обрабатываются резанием. Их применяют для изготовления деталей путем горячей штамповки и обработки резанием.

Оловянистые латуни ЛО70-1 и ЛО62-1 обладают высоким сопротивлением коррозии, хорошо обрабатываются давлением в горячем состоянии.

Никелевая латунь ЛН65-5 обладает высокой прочностью и вязкостью, высокими антикоррозионными и антифрикционными свойствами. Она хорошо обрабатывается давлением в горячем и холодном состоянии. Применяют эту латунь вместо бронзы при изготовлении вкладышей подшипников, пружин и т. п.

Коррозионноустойчивые детали отливают из алюминиевой латуни ЛА67-2,5; подшипники, втулки и другие антифрикционные детали отливают из латуней марок ЛАЖ60-1-1, ЛКС80-3-3, ЛМцС58-2,2, ЛМцЖ52-4-1; арматуру и шестерни отливают из латуней марок ЛК80-3, ЛМцОС58-2-2-2 и др.

Бронзы — сплавы меди с оловом, алюминием, свинцом, кремнием, бериллием, хромом, сурьмой, марганцем. В некоторые бронзы вводят также железо, никель, марганец. Раньше к бронзам относили только сплавы двойной системы медь — олово. Сейчас разработаны новые сплавы на медной основе, в которых олово частично или

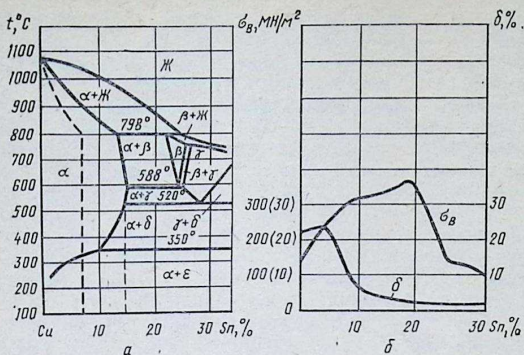


Рис. 5.35. Диаграмма состояния системы Cu—Sn (а), механические свойства литой бронзы в зависимости от содержания олова (б).

полностью заменено другими элементами. Однако название осталось прежним.

Бронзы маркируют следующим образом. В начале марки ставят буквы Бр. — бронза, затем следуют буквенные обозначения элементов, входящих в ее состав (буквенные обозначения элементов аналогичны обозначениям в маркировке латуней), и за ними цифры, указывающие среднее содержание элементов в процентах. В отличие от латуней у бронз содержание меди не указывают, а определяют вычитанием из 100% суммы всех входящих в бронзу элементов. Например, бронза марки Бр.ОФ10-1 содержит 10% олова, 1% фосфора и 89% меди и неизбежных примесей.

По содержанию легирующих компонентов различают оловянные и безоловянные бронзы.

Оловянные бронзы. На рисунке 5.35 представлена левая часть диаграммы состояния системы Cu—Sn, охватывающая бронзы, применяемые в промышленности. Практический интерес представляют сплавы, содержащие до 14% олова. Они обладают высокими механическими и антифрикционными свойствами. Сплавы, содержащие до 14% олова, при медленном охлаждении одно-

фазы, состоят из однородного твердого раствора олова в меди (α -фаза).

На рисунке XVI представлена микроструктура литой бронзы с 10% олова. При содержании более 14% (до 22%) олова бронза становится двухфазной (β -фаза). Однофазные бронзы, содержащие до 5...6% олова, обладают хорошей пластичностью (Бр.ОФ6,5-0,15; Бр.ОФ4-0,25; Бр.ОЦ4-3; Бр.ОЦС4-4-2,5). Из этих бронз изделия изготовляют ковкой, штамповкой и прокаткой. Бронзы с более высоким содержанием олова являются литейными. (Бр.ОЦСНЗ-7-5-1; Бр.ОЦСЗ-12-5; Бр.ОЦС5-5-6; Бр.ОЦС4-4-17; Бр.ОЦСЗ,5-7-5).

Ввиду высокой стоимости оловянные бронзы применяют только для наиболее ответственных изделий. В настоящее время в машиностроении и ремонтном производстве чаще используют более дешевые бронзы, не содержащие олова.

Алюминиевые бронзы — сплавы меди с 4...11,5% алюминия, в которые для улучшения свойств вводят железо, никель, марганец. Они обладают высокими механическими свойствами, повышенной жаропрочностью и антикоррозионной стойкостью.

Алюминий (при содержании его до 10%) повышает прочность сплава. Бронзы, содержащие 6...8% алюминия, обрабатывают давлением в холодном и горячем состоянии, а содержащие 9...10% поддаются обработке давлением только при высоких температурах. Широкое применение получили бронзы Бр.А5, Бр.А7, Бр.АМц9-2, Бр.АМц9-2Л, Бр.АМц10-2, Бр.АЖ9-4, Бр.АЖМц10-3-1,5. Буква Л в конце марки показывает, что бронза литейная.

Алюминиевые бронзы могут подвергаться упрочняющей термической обработке (закалка с 850...900 °С в воде и отпуск при 400...600 °С в течение 1,5 ч).

По коррозионной стойкости алюминиевые бронзы значительно превосходят оловянные, особенно по устойчивости в соленой воде, при повышенных температурах. По сопротивлению коррозии они до 12 раз устойчивее оловянных и в 2...3 раза — нержавеющей сталей.

Бериллиевые бронзы — сплавы меди с бериллием, содержащие 1,6...2,2% бериллия (Бр.Б2, Бр.БНТ1,7; Бр.БНТ1,9). Наиболее распространена бронза Бр.Б2, обладающая высокой прочностью и упругостью, химической стойкостью и износоустойчивостью. Она хорошо

сваривается и обрабатывается резанием. Эту бронзу закаливают с 800°C в воде и подвергают искусственному старению при 350°C в течение 9 ч. После термической обработки бериллиевые бронзы приобретают высокую прочность и твердость.

Термическая обработка бериллиевой бронзы основана на неодинаковой растворимости бериллия в меди при различных нагревах. При закалке образуется пересыщенный твердый раствор бериллия в меди, а при старении из него выделяется избыточный бериллий в виде весьма измельченных включений химического соединения меди с бериллием, что и является причиной упрочнения.

Сочетание в бериллиевых бронзах электропроводности, коррозионной стойкости, упругости и прочности позволяет изготавливать из нее особо ответственные детали (сильфоны, мембраны, пружины, щеткодержатели, пружинящие контакты и др.). Инструменты из бериллиевой бронзы при работе не дают искр. Серьезным недостатком бериллиевых бронз является их высокая стоимость.

Кремниевые бронзы — сплавы меди, содержащие 0,6...3,5% кремния и небольшое количество никеля и марганца (Бр.КМц3-1; Бр.КН1-3). Эти бронзы обладают высокой упругостью и выносливостью, хорошей антикоррозионной стойкостью и антифрикционностью, хорошо поддаются обработке литьем и давлением в горячем состоянии, удовлетворительно свариваются и обрабатываются резанием, упрочняются термической обработкой или наклепом.

Свинцовистые бронзы — сплавы меди со свинцом, содержащие 27...63% свинца (Бр.С30; Бр.СН60-2,5), имеют высокие антифрикционные свойства. Их применяют для изготовления деталей, работающих в условиях трения скольжения.

Микроструктура свинцовистых бронз состоит из кристаллов твердой меди и мягкого свинца (рис. XVII). Это придает сплаву хорошие антифрикционные свойства. Механические свойства характеризуются высокими значениями предела усталости и более высокой, чем у других антифрикционных материалов, стойкостью против ударных нагрузок.

Свинцовистые бронзы пригодны для вкладышей подшипников, работающих с большими скоростями и при

повышенных давлениях. Широко применяют бронзу Бр. С30, теплопроводность которой в 4 раза превышает теплопроводность оловянных бронз.

§ 2. Алюминий и его сплавы

Алюминий — металл серебристо-белого цвета с матовым оттенком. Кристаллическая решетка его представляет гранцентрированный куб. Полиморфных превращений алюминий не имеет. Плотность его $2,7 \text{ т/м}^3$, температура плавления 660°C . Прочность чистого отожженного алюминия очень мала ($\sigma_{\text{в}} = 80 \dots 100 \text{ Н/см}^2$), а пластичность высокая (относительное удлинение составляет $35 \dots 40\%$).

Чистый алюминий применяют в электротехнике для изготовления проводников тока. Тепло- и электропроводность алюминия несколько ниже, чем у чистой меди. Все примеси, присутствующие в алюминии, ухудшают эти показатели. Коррозионная стойкость чистого алюминия высокая благодаря защитному действию плотной пленки окисла. Алюминий стоек в атмосферных условиях и в концентрированной азотной кислоте, но легко разрушается соляной, серной кислотами и щелочами. Алюминий допускает глубокую вытяжку, удовлетворительно сваривается газовой и контактной сваркой, плохо обрабатывается резанием и имеет низкие литейные качества.

ГОСТ предусматривает алюминий особой чистоты (А999), высокой чистоты (А995, А99, А97 и А95) и технической чистоты (А85, А8, А7, А6, А0, А и АЕ). Буква А в марке обозначает алюминий. Последующие цифры указывают чистоту алюминия. Например, алюминий марки А99 содержит $99,99\%$ алюминия и $0,01\%$ примесей, а алюминий А8 — $99,8\%$ алюминия и $0,2\%$ примесей.

Алюминий высокой чистоты применяют для изготовления фольги, идущей на электрические конденсаторы и для других целей. Токоведущие детали изготовляют из алюминия технической чистоты (А85, А8, А7, А6). Для изготовления алюминиевых сплавов применяют алюминий марок А5, А0 и А.

Основную массу алюминия расходуют на производство алюминиевых сплавов, которые делят на деформируемые и литейные.

Деформируемые алюминиевые сплавы в зависимости от химического состава делят на семь групп: сплавы системы Al—Mn (AMц); сплавы системы Al—Mg—Si (AD31, DD33, AD35, AB); сплавы системы Al—Cu—Mg (D1, D16, B65, BD17, D18, D19); сплавы системы Al—Mg—Mn (AMг1, AMг2, AMг3, AMг5, AMг6); сплавы системы Al—Mg—Zn—Cu (B93, B94, B95, B96); сплавы системы Al—Cu—Mg—Ni—Fe (AK2, AK4, AK4-1); сплавы системы Al—Si—Mg—Cu (AK6, AK7, AK8).

Алюминиевые деформируемые сплавы разделяют на сплавы упрочняемые и не упрочняемые термической обработкой.

Высокопластичные термически неупрочняемые сплавы разделяют на «мягкие» (AD, AD0, AD1, AMц, AMг, AMг2) и «твердые» (AMг3, AMг5, AMг6). Содержание магния в этих сплавах колеблется от 2 до 7%, а марганца — от 1 до 1,6%. По структуре эти сплавы представляют однородный твердый раствор марганца, магния, меди и других элементов в алюминии. Указанные сплавы упрочняют деформацией в холодном состоянии (наклеп).

Деформируемые сплавы, упрочняемые термической обработкой, приобретают высокие механические свойства и хорошую сопротивляемость коррозии только после термической обработки. Эти сплавы делят на авиалы (AB, AD31, AD33), дуралюмины (D1, D16, AK6, AK8), (рис. XVIII), сплавы высокой прочности (B96, B95) и специальные сплавы (жаропрочные), работающие при повышенных температурах (AK4, AK4-1, BD17).

Термическая обработка заключается в закалке и последующем старении. Изменение структуры при нагревании и охлаждении можно проследить по диаграмме состояния системы Al—Cu (рис. 5.36). Выбор температуры закалки определяется левой частью этой диаграммы. Из диаграммы видно, что алюминий с медью образует ограниченные твердые растворы различной концентрации (в зависимости от температуры) и химическое соединение $CuAl_2$. Сплавы, содержащие до 0,5% меди, после медленного охлаждения имеют однофазную структуру α -раствора меди в алюминии. При содержании 0,5...5,7% меди двухфазная структура состоит из α -раствора и $CuAl_2$. Если этот двухфазный сплав нагреть до температуры выше линии предельной растворимости меди в алюминии (выше 548 °C), то химическое соединение $CuAl_2$

растворится в алюминии и сплав станет однофазным. Это используют при закалке сплавов системы Al—Cu. При быстром охлаждении примерно с 550 °С CuAl₂ не успевает выделяться из α-раствора и последний фиксируется в неустойчивом метастабильном состоянии. Этот пересыщенный твердый раствор сохраняется, как правило, около 30 мин (инкубационный период), а в дальнейшем распадается с выделением соединения

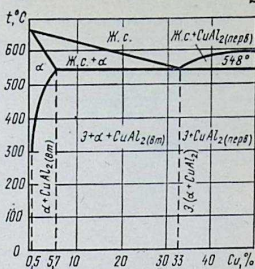


Рис. 5.36. Часть диаграммы состояния сплавов системы Al—Cu.

CuAl₂, то есть происходит процесс старения. После старения прочность и твердость увеличиваются. Во время инкубационного периода можно осуществлять пластическую деформацию. По окончании этого периода производить обработку давлением нельзя.

Литейные алюминиевые сплавы предназначены для изготовления отливок деталей сложной конфигурации, производство которых резанием нецелесообразно.

К литейным сплавам предъявляют определенные требования. Они должны быть достаточно жидкотекучими, не образовывать трещин при кристаллизации, обладать хорошей герметичностью, давать малую усадку при кристаллизации.

Литейные сплавы можно разделить на пять групп: сплавы системы Al—Mg (АЛ8, АЛ13, АЛ22, АЛ23, АЛ27, АЛ28 и АЛ29); сплавы системы Al—Si (АЛ2, АЛ4, АЛ4В, АЛ9 и АЛ9В); сплавы системы Al—Cu (АЛ7, АЛ7В, АЛ19); сплавы системы Al—Si—Cu (АЛ3, АЛ3В, АЛ5, АЛ6, АЛ10В, АЛ14В, АЛ15В); сплавы системы Al—прочие элементы (АЛ1, АЛ11, АЛ16В, АЛ17В, ВЛ18В, АЛ20, АЛ21, АЛ24, АЛ25, АЛ26 и АЛ30). Литейные алюминиевые сплавы могут подвергаться термической обработке (табл. 10).

Широко известны сплавы системы Al—Si, получившие название силуминов (рис. 5.37). Типичный силумин — эвтектический сплав АЛ2, содержащий 10...13% Si. Сплав имеет хорошие литейные свойства: низкую

10. Виды и назначение термообработки изделий из литейных алюминиевых сплавов

Вид термической обработки	Назначение
Искусственное старение без закалки	Улучшение обрабатываемости резанием для повышения чистоты поверхности. Повышение механической прочности (до 20%) деталей из сплавов АЛЗ, АЛ5 и др.
Отжиг	Снятие литейных и термических напряжений, наклепа. Повышение пластичности сплава
Закалка	Повышение прочностных характеристик и коррозионной стойкости деталей, работающих при температурах до 100°C
Закалка + неполное искусственное старение	Получение высокого предела прочности при сохранении хорошей пластичности
Закалка + полное искусственное старение	Получение максимальной прочности при некотором снижении пластичности
Закалка + стабилизирующий отпуск	Получение достаточно высокой прочности и высоких стабильных свойств по структуре и объемным изменениям
Закалка + смягчающий отпуск	Получение повышенной пластичности и стабильных размеров при некотором снижении прочностных характеристик

температуру плавления, высокую жидкотекучесть, малую усадку и др.

Сплав упрочняют модифицированием. Для этого в жидкий сплав вводят натрий в виде смеси, состоящей из $\frac{2}{3}$ NaF и $\frac{1}{3}$ NaCl, в количестве 2% массы жидкого сплава. До модифицирования сплав, содержащий 12...13% Si, состоит из эвтектики, имеющей грубоигольчатое строение (рис. XIX), и первичных кристаллов β -фазы (кремний). После модифицирования эвтектика становится мелкозернистой, а заэвтектические сплавы по структуре становятся доэвтектическими с первичными дендритами α -раствора (алюминий) (рис. XX). Модифицированный силумин на 30...40% прочнее немодифицированного и пластичнее его в 2...3 раза.

Из сплава АЛ2 изготавливают детали, испытывающие ударные нагрузки, тонкостенные детали, детали сложной конфигурации.

Для изготовления наиболее нагруженных деталей используют сплавы АЛ4 и АЛ5. Литые детали из алюми-

нневых сплавов, предназначенные для работы при температурах до 250...300 °С, изготавливают из жаропрочного сплава АЛ1. Из него делают головки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, поршни и т. п.

Спеченные алюминиевые сплавы обладают особыми физическими свойствами и содержат большое количество легирующих элементов.

Спеченные алюминиевые сплавы (САС) получают брикетированием, спеканием и деформированием порошков алюминия и легирующих элементов или порошков стандартных алюминиевых сплавов.

К числу таких сплавов относят САС1 (25...30% Si, 5...7% Ni, остальное Al), который применяют для деталей приборов, работающих в паре со сталью при 20...200 °С, где необходимо сочетание низкого коэффициента линейного расширения с малой теплопроводностью.

Для деталей, работающих при высоких температурах, применяют спеченные алюминиевые порошки (САП1...САП4), представляющие собой сплавы алюминия с его окисью (Al_2O_3). Их получают спеканием и деформированием дисперсного алюминиевого порошка, содержащего от 6 до 22% Al_2O_3 .

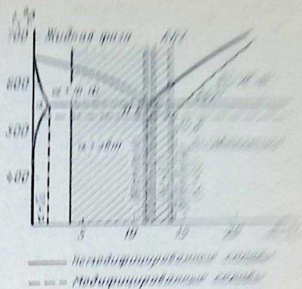


Рис. 5.37. Диаграмма температурного расширения сплавов системы Al-Si

§ 3. Антифрикционные сплавы на основе алюминия, олова, свинца и цинка

Антифрикционные сплавы применяют для изготовления подшипников скольжения. Основные требования, предъявляемые к антифрикционным сплавам, определяются условиями работы подшипника скольжения. Эти сплавы должны иметь достаточную, но не очень высокую твердость, чтобы не вызвать сильного износа вала; сравнительно легко деформироваться под влиянием местных напряжений, то есть быть пластичными; удерживать смазку на своей поверхности; иметь

малый коэффициент трения. Температура плавления этих сплавов не должна быть высокой. Сплавы должны обладать хорошей теплопроводностью и быть коррозионностойкими.

Для обеспечения этих свойств антифрикционные сплавы должны иметь гетерогенную структуру, состоящую из мягкой пластичной основы и включений более твердых частиц. При вращении вал опирается на твердые частицы, которые обеспечивают износостойкость, а основа, истирающаяся более быстро, прирабатывается к валу и образует сеть микроскопических каналов, по которым циркулирует смазка и уносятся продукты износа.

Наиболее широко применяют антифрикционные сплавы на основе алюминия, олова и свинца (баббиты), сплавы на основе цинка и медно-свинцовые сплавы (бронзы).

ГОСТом предусмотрены подшипниковые сплавы на основе алюминия (А03-1, А09-2, А020-1, АН2,6), основными компонентами которых являются Sn, Cu, Ni и Si.

Чем больше в сплаве олова, тем выше его антифрикционные свойства. Однако в литых сплавах содержание олова не должно превышать 10...12%, так как образующаяся грубая сетка оловянистой составляющей снижает износостойкость и сопротивление усталости при повышении температуры.

Сплавы А03-1 и А09-2 идут для отливки монометаллических вкладышей и втулок толщиной более 10 мм в транспортном и общем машиностроении. Сплавы А020-1, АН2,5 и сталь идут на изготовление биметаллической ленты методом прокатки с последующей штамповкой вкладышей. Подшипники из сплава АН2,5 могут изготавливаться и отливкой.

Подшипники на основе алюминия работают при нагрузке не более 2000—3000 Н/см² и окружной скорости 15...20 м/с.

Баббиты Б89 и Б83 — многокомпонентные сплавы, основой которых является система Sn—Sb (табл. 11).

Сурьма и олово сильно различаются по плотности, поэтому сплавы этих металлов склонны к значительной ликвации. Для предупреждения ликвации в баббиты вводят медь. Она образует с сурьмой химическое соединение Cu₃Sn, которое кристаллизуется первым, образуя разветвленные дендриты. Они препятствуют ликвации

11. Химический состав (%) и назначение баббитов

Марка сплава	Sb	Cu	Cd	Sn	Другие элементы	Назначение
Б89	7,3...7,8	0,8...1,2	0,8...1,2	Остальное	0,15...0,25	Тяжелонагруженные машины, паровые турбины, турбонасосы и т. д.
Б83 БН	10...12 13...15	5,5...6,5 1,5...2,0	— 0,1...0,7	То же 9...17	— 0,1...0,5 0,5...0,9	Машины средней нагруженности
Б16	15...17	1,5...2,0	—	15...17	—	Автомобильные двигатели

Примечание. Во всех сплавах, кроме Б89 и Б83, основа — свинец.

кубических кристаллов SnSb. Кроме того, кристаллы Cu_3Sn образуют в баббите твердые включения, дополнительно повышающие износостойкость подшипника.

На рисунке XXI приведена микроструктура баббита Б83. Темное поле представляет собой пластичную массу α -твердого раствора сурьмы и меди в олове, светлые крупные кристаллы квадратной формы — соединение SnSb, мелкие светлые включения — соединение Cu_3Sn .

Свинцовые баббиты применяют для подшипников менее ответственных установок, Баббиты Б16, БН, БС6 имеют структуру, состоящую из твердого раствора олова, сурьмы и меди в свинце (мягкая составляющая) и твердых частиц химических соединений Cu_3Sn , Cu_2Sb , SnSb.

Мышьяк в состав баббитов вводят для измельчения структуры, кадмий — для повышения прочности и твердости, никель — для повышения жидкотекучести, коррозионной стойкости и сопротивления ударным нагрузкам.

Большое распространение получили баббиты с кальцием и натрием (БКА, БК2, БК2Ш). В литом виде структура баббита представляет собой α -твердый раствор натрия и кальция в свинце (мягкая составляющая) и дендриты химического соединения Pb_3Ca (твердые включения). Сплав СОС-6-6 содержит 6% олова, 6% сурьмы, остальное — свинец. Его применяют для заливки подшипников автомобильных двигателей. Сплав об-

ладает более высокой усталостной прочностью в сравнении с оловянными и свинцовыми баббитами и обеспечивает меньший износ шеек коленчатого вала. Сплав СОС-6-6 применяют при изготовлении вкладышей из триметаллической ленты, состоящей из стальной ленты и пористого медно-никелевого подслоя, пропитанного сплавом СОС-6-6.

§ 4. Титан и его сплавы

Титан — серебристо-белый металл, относится к группе тугоплавких металлов, его температура плавления 1668°C , кипения 3227°C , плотность $4,507\text{ т/м}^3$, твердость НВ850, прочность 320 Н/см^2 . Титан имеет две аллотропические модификации. До $882,5^{\circ}\text{C}$ существует α -титан с гексагональной плотноупакованной решеткой, а при температуре выше $882,5^{\circ}\text{C}$ — β -титан с кубической объемноцентрированной решеткой. При переходе α -титана в β -титан объем металла несколько уменьшается, а электропроводность скачкообразно возрастает. Титан обладает высокой удельной прочностью даже при температуре 500°C и отличной коррозионной стойкостью.

Несмотря на то что титан химически весьма активен и легко реагирует со многими элементами, он обладает высокой коррозионной стойкостью благодаря защитному действию образующейся на его поверхности прочной и плотной окисной пленки.

Чистый титан пластичен, мягок, а технический — хрупок и тверд. В промышленности применяют титан марок ВТ-1 и ВТ-2. Вследствие недостаточной прочности чистый титан имеет ограниченное применение. Значительный интерес представляют сплавы титана.

При введении легирующих элементов получают сплавы титана, обладающие высокой механической прочностью. Основные легирующие элементы — Al, Sn, Mn, Cr, Mo, V. Они влияют на устойчивость аллотропических модификаций титана. В зависимости от этого титановые сплавы подразделяют на три структурные группы: с α -, ($\alpha+\beta$)- и β -структурой.

Сплавы с α -структурой имеют при нормальной температуре однофазную структуру α -твердого раствора, термически обрабатываются, малопластичны (например, сплав ВТ5-1).

Двухфазные сплавы с $(\alpha+\beta)$ -структурой имеют при нормальной температуре структуру α - и β -твердых растворов, термически обрабатываются, пластичны, обладают высокими механическими свойствами (BT3-1, BT6).

Сплавы с β -структурой сохраняют структуру β -твердого раствора, не подвергаются термической обработке, пластичны, малопрочны и не находят широкого применения в технике (BT15).

Титан и его сплавы хорошо поддаются горячей и холодной обработке давлением, хорошо свариваются в инертной среде, но обладают низкими антифрикционными свойствами и, сравнительно со сталью, хуже обрабатываются резанием.

В настоящее время есть большая группа высокопрочных титановых сплавов (BT6, BT14, BT3-1, BT5-1, BT16 и др.), широко используемых для изготовления разнообразного оборудования. Из них делают реакторы для агрессивных сред, выпарные аппараты, насосы, теплообменники, вентили, центрифуги, опреснительные установки, котлы, холодильники, резервуары для органических кислот, каркасы и обшивки самолетов, топливные баки, компрессоры реактивных двигателей, диски и лопатки турбин, обшивки корпусов судов, гребные винты, насосы, трубы, используемые при бурении, газопоглотители, детали электронновакуумных приборов, конденсаторы, медицинские инструменты, внутренние протезы.

Глава XI. ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 1. Производство порошковых сплавов

Сплавы, изготавливаемые из металлических порошков путем прессования и спекания без расплавления или с частичным расплавлением, называют порошковыми (псевдосплавы).

Несмотря на то что объем производства их невелик, они имеют очень большое значение в народном хозяйстве и область их применения чрезвычайно широка. Многие детали из порошковых сплавов отличаются лучшими качествами, чем детали из обычных металлов.

Порошковые сплавы в зависимости от назначения делят на несколько типов: антифрикционные — для под-

шипников скольжения; фрикционные — для тормозных лент и дисков муфт сцепления; пористые — для фильтров; плотные — для деталей машин из стали, жаропрочных и окалинстойких сплавов; тугоплавкие — для проволоки ламп накаливания, контактов и деталей приборов; электротехнические — для контактов и постоянных магнитов; твердые сплавы — для режущего инструмента, волок, буров.

Технология производства порошковых сплавов включает в себя получение порошка, составление шихты, прессование и спекание.

Важнейшие методы производства порошков — восстановление металлов из окислов; механическое измельчение, электролитическое осаждение, распыление жидкого металла, нагрев и разложение карбониллов. Наибольшее распространение получили первые два метода.

Порошковая металлургия предъявляет весьма строгие требования к форме и размерам частиц порошков. Одной из важнейших характеристик порошка является «насыпной вал», который определяется весом 1 см^3 свободно насыпанного порошка и зависит от размера, формы и состояния поверхности частиц.

Перед прессованием порошки просеивают, подвергают смягчающему или восстановительному отжигу и тщательно (длительно) перемешивают.

Прессование производят в пресс-формах при давлении $100 \dots 1000 \text{ МПа}$, которое зависит от твердости порошка и формы изделия: чем тверже порошок, тем больше давление прессования.

Спекают порошки в защитной атмосфере. Температура спекания составляет примерно $\frac{2}{3}$ температуры плавления наиболее легкоплавкой составляющей сплава. Длительность спекания $2 \dots 3 \text{ ч}$. Спекание может быть с оплавлением и без оплавления. У сплавов, образующих жидкую фазу, усадка в процессе спекания составляет $5 \dots 25\%$, а у сплавов, не образующих жидкой фазы, — $0,5 \dots 2,5\%$.

В настоящее время все шире начинают применять горячее прессование. При этом совмещают операции прессования и спекания. Давление при горячем прессовании составляет $5 \dots 10\%$ давления обычного прессования. Этим способом получают изделия сложной формы и точных размеров.

§ 2. Металлокерамические твердые сплавы

Порошковым твердым сплавом называют сплав, состоящий из тончайших зерен карбидов (например, WC), связанных между собой твердым раствором WC в кобальте.

Металлокерамические твердые сплавы обладают высокой красностойкостью и стойкостью на истирание, они сохраняют режущие свойства при нагреве до $1000^\circ C$. Из них делают режущий инструмент, волочильное, буровое и другое оборудование.

Металлокерамические твердые сплавы делятся на вольфрамовые, титановольфрамовые и титанотанталовольфрамовые.

Сплавы первой группы состоят из карбидов вольфрама и металлического кобальта и обозначаются буквами ВК и цифрой, показывающей процентное содержание кобальта (ВК2, ВК3, ВК3М, ВК4, ВК4В, ВК6М, ВК6, ВК6В, ВК8, ВК8В, ВК10, ВК15, ВК20, ВК25). Так, сплав ВК2 имеет около 2% кобальта и около 98% карбидов вольфрама.

В сплавы второй группы входят карбиды вольфрама, карбиды титана и металлический кобальт. Обозначают их буквами ТК и цифрами. Цифра, стоящая после буквы Т, указывает процентное содержание карбидов титана, а цифра после буквы К — процентное содержание кобальта, остальное — карбиды вольфрама (Т30К4, Т15К6, Т14К8, Т15К10, Т15К12В).

Сплавы третьей группы состоят из карбидов вольфрама, карбидов титана, карбидов тантала и металлического кобальта. Обозначают их буквами ТТК и цифрами. Цифра, стоящая после букв ТТ, указывает процентное содержание карбидов титана и тантала, вместе взятых, а цифра после буквы К — процентное содержание кобальта, остальное — карбиды вольфрама (ТТ7К12, ТТ10К8В). Буквы в конце твердого сплава характеризуют размеры зерен (В — крупнозернистые, М — мелкозернистые).

Качество и режущие свойства порошковых твердых сплавов зависят от их микроструктуры. Микроструктура вольфрамокобальтового твердого сплава ВК15 состоит из светлых угловатых и прямоугольных зерен карбида

вольфрама и темных участков твердого раствора карбида вольфрама в кобальте (рис. XXII).

Светлые зерна карбидов вольфрама имеют очень большую твердость и в режущем инструменте играют роль элементарных режущих частичек. Твердый раствор карбида вольфрама в кобальте менее тверд, но более вязок. Он соединяет между собой зерна карбидов вольфрама.

Микроструктура титановольфрамового сплава Т15К6 состоит из угловатых светлых зерен карбида вольфрама, темной массы твердого раствора карбидов вольфрама и титана в кобальте и серого поля твердого раствора вольфрама в карбидах титана (рис. XXIII).

§ 3. Наплавочные твердые сплавы

В зависимости от технологии получения твердые сплавы делят на металлокерамические, получаемые методом порошковой металлургии, и наплавочные, которые, в свою очередь, делят на литые, зернообразные и электродные. Эти сплавы наплавляют на рабочую кромку инструмента или на поверхность изделия, подвергающуюся износу. Условно литые твердые сплавы можно поделить на три группы.

К первой группе относится релит, являющийся композицией литых карбидов вольфрама. Температура плавления релита 3500 °С. Релит содержит 0,25% железа, остальное вольфрам, обладает высокой твердостью, износоустойчивостью.

Во вторую группу входят стеллиты (В2К, В3К, ВХН1, ВХН2) — сплавы, содержащие главным образом кобальт и вольфрам (В2К и В3К), никель и хром (ВХН1, ВХН2), а также сормаиты.

На структуру и механические свойства стеллитов оказывает влияние скорость охлаждения. При быстром охлаждении зерно измельчается и повышается твердость сплавов.

Стеллиты обладают высокой стойкостью против коррозии. Хорошая свариваемость позволяет использовать их для наплавки на инструменты, благодаря чему их стойкость значительно повышается.

Сормаиты — сплавы на железохромовой основе с марганцем и никелем — менее твердые и красностойкие, чем стеллиты, но более дешевые. Сормаиты по сущест-

ву представляют собой легированный хромоникелевый чугун. Высокой твердости сормайт-2 достигают в результате закалки и отпуска (рис. XXIV).

Стеллит и сормайт обладают значительной хрупкостью. Сплавы выпускаются в виде прутков диаметром 5...10 и длиной 300...400 мм. Сормайт выпускают и в виде порошка.

Стеллит марки В2К и сормайт-1 наплавляют на детали, работающие без резких толчков и ударов (матрицы гибочных и вытяжных штампов, центры токарных станков, скобы, шаблоны и т. п.).

Стеллит марки В3К и сормайт-2 имеют несколько меньшую твердость и хрупкость. Их наплавляют на изделия, работающие с толчками и ударами, в условиях абразивного изнашивания (матрицы вырубных и вырезных штампов, лемеха плугов, лапы культиваторов, полевые доски и т. п.).

К третьей группе относится сталинит М. Это сплав на железной основе (24...26% хрома, 6...8,5% марганца, до 3% кремния, 7...10% углерода). Сталинит получают размолом и дроблением феррохрома, ферромарганца, нефтяного кокса и чугунной стружки. После тщательного смешивания смесь прокаливают при 400...500 °С в течение 3...4 ч, а затем дробят.

Наплавленный сталинит образует твердый износостойчивый слой, имеющий микроструктуру легированного белого заэвтектического чугуна. Его применяют для наплавки деталей, подвергающихся грубому износу (щеки камнедробилок, зубья и козырьки ковшей экскаваторов, ножи бульдозеров и т. п.).

§ 4. Минералокерамические твердые сплавы

Все большее применение находит новый дешевый инструментальный материал — минеральная керамика марки ЦМ332 (минералокерамический твердый сплав — микролит). Она не содержит дефицитных и дорогостоящих элементов. Основа сплава — окись алюминия (корунд) с размерами зерен 0,5...3 мкм, подвергнутая спеканию при 1700...1800 °С.

Из минеральной керамики изготавливают пластинки различной формы и размеров, которыми оснащают режущие инструменты.

В настоящее время выпускают непёретачиваемые минералокерамические пластинки трех-, пяти- и шестигранной формы для обработки закаленных и незакаленных сталей, чугуна. Пластинки получают горячим литьем под давлением (шликерный метод) и прессованием порошков. К державкам инструментов пластинки припаивают или приклеивают.

Минералокерамические материалы обладают более высокой красностойкостью, чем твердые сплавы, но в то же время они менее прочны, поэтому не выдерживают больших нагрузок, особенно ударных. Используют сплавы в основном для изготовления инструментов для чистовой и получистой обработки. Микролит более пригоден для резания хрупких и твердых материалов, чем вязких и мягких. Стойкость минералокерамического инструмента в одних и тех же условиях резания чугуна выше, чем при обработке стали.

Минералокерамические материалы имеют пониженную теплопроводность, поэтому быстрые и неравномерные нагрев и охлаждение приводят к образованию трещин на пластинках.

Глава XII. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 1. Пластические массы

Среди новых конструкционных материалов, необходимых для ускорения технического прогресса во многих отраслях народного хозяйства, видное место принадлежит пластмассам. *Пластмассами* называют искусственные материалы, получаемые на основе органических полимерных связующих веществ. В пластмассах дисперсионной средой (матрицей) является полимер, а дисперсной фазой — наполнитель.

Полимерами называют высокомолекулярные соединения, молекулы которых (макромолекулы) состоят из большого числа повторяющихся мономерных звеньев, соединенных в линейные (цеповидные), разветвленные, лестничные и трехмерные сетчатые стернорегулярные, изотактические и другие структуры.

Полимеры с линейными и разветвленными макромолекулами (термопласты) являются более пластичными и термопластичными. Они способны многократно раз-

мягчаться и затвердевать при нагреве и охлаждении в отличие от полимеров с сетчатыми макромолекулами (реактопласты), которые после затвердевания не размягчаются под влиянием нагрева. Их нельзя использовать повторно.

Полимеры могут находиться в трех состояниях: стеклообразном (твердом аморфном), высокоэластичном и вязкотекучем. Вследствие высокой относительной молекулярной массы они не способны переходить в газообразное состояние.

В качестве дисперсной фазы (наполнитель) используют бумагу (гетинакс), ткани различной структуры (стеклотекстолиты, текстолиты), древесный шпон (древесно-слоистые пластики ДСП), стекловолоконистые материалы (стеклопластики), асбоволоконистые материалы (асбопластики) и др. Название пластмассы обычно связано с наименованием и видом наполнителя.

Пластмассы, армированные различными наполнителями, не являются универсальными материалами, и возможность их применения в ответственных конструкциях прежде всего определяется условиями работы изделия. В таблице 12 приведена характеристика некоторых пластмасс и область их применения.

По составу пластмассы бывают простыми, если они состоят из чистых связующих смол и сложными (композиционными), если в них, кроме связующего вещества, содержатся и другие компоненты: наполнители, пластификаторы, смазывающие вещества, стабилизаторы, красители, катализаторы и др.

Стабилизаторы (антистарители) противодействуют старению полимерных материалов. К ним относят воду, фосфаты, аминокислоты и др.

Пластификаторы повышают эластичность, пластичность при переработке и эксплуатации полимерных материалов. В качестве пластификаторов используют дибутилфталат, трикрезилфосфат, камфору и др.

Смазывающие вещества (стеарин, воск и др.) снижают адгезию полимеров, главным образом, для ускорения и повышения качества переработки.

Красители придают желаемый цвет пластмассам по всему объему. Имн могут быть нигрозин, мумия и др.

Катализаторы (известь, окись магния) ускоряют химические процессы, но не входят в состав окончательного продукта.

12. Характеристика и область применения некоторых пластмасс

Наименование пластмассы	Наполнитель	Характеристика материала	Метод переработки	Область применения
Полиэтилен	Без наполнителя	Бесцветный роговидный материал, жирный на ощупь. Имеет высокие диэлектрические свойства. Стоек к воде, аммиаку, азотной, серной, соляной кислотам, этиловому спирту. Ограничено устойчив к бензину, метиловому спирту. Неустойчив к бензолу, уксусной кислоте, нефти, эфирным маслам. Свойства: $\gamma = 920 \dots 960 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_B = 11 \dots 13 \text{ Н/мм}^2$ (полиэтилен высокого давления); $\delta = 450 \%$; теплостойкость до $50 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$; морозостойкость до $-65 \text{ }^\circ\text{C}$	Литье под давлением	Арматура трубопроводов, трубы, фланцевый и прокладочный материал, пленки, крышки аккумуляторов, крыльчатки вентиляторов
Поливинилхлорид (винипласт)	Без наполнителя	Обычно окрашен в светло- или темно-коричневый цвет. Получен бесцветный и прозрачный винипласт. Стоек против воздействия всех минеральных кислот, щелочей, растворов солей любой концентрации, бензина. Неустойчив к ацетону, азотной кислоте. Свойства: $\gamma = 1380 \dots 1400 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_B = 50 \dots 70 \text{ Н/мм}^2$; $\delta = 10 \dots 25 \%$; теплостойкость до $80 \text{ }^\circ\text{C}$; морозостойкость до $-50 \text{ }^\circ\text{C}$	Прессование при $160 \dots 170 \text{ }^\circ\text{C}$, вальцевание	Трубы, уплотнительные прокладки, вентилялы, электронизационный материал, банки аккумуляторов

Фторопласт-3
Фторопласт-4

Без наполните-
ля

Рыхлый порошок, при прессовании превращается в плотные таблетки. При нагревании не плавится, а размягчается. При 360...380 °C спускается в плотную белую массу. Не растворяется ни в одном растворителе. Диэлектрик. Свойства: $\gamma = 2100 \dots 2300 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_b = 14 \dots 31 \text{ Н/мм}^2$; $\delta = 250 \dots 500 \%$; теплостойкость до 130 °C при низкой нагрузке (до 60 °C — при высокой); морозостойкость до -80 °C .

Без наполните-
ля

Смола белого или светло-желтого цвета. Капрон исключительно стойк к маслам, щелочам, бензину, бензолу, спиртам. Ограниченно устойчив к ацетону. Неустойчив к серной, соляной, уксусной кислотам. Вода придает капрону эластичность. Свойства: $\gamma = 1130 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_b = 65 \text{ Н/мм}^2$; $\delta = 150 \dots 200 \%$; теплостойкость до 65 °C; морозостойкость до -10 °C .

Горячее прессова-
ние при 220 °C,
литье под давле-
нием

Уплотнительные де-
тали для высоких да-
влений, диафрагмы,
седла клапанов, мемб-
раны, подшипники,
штулки, детали мо-
лочной оборудова-
ния

Литье под давле-
нием при 270 °C

Ответственные де-
тали машин, подшип-
ники скольжения,
шестерни, шпильки. Из
вольфрамового порош-
ка, вольфрама, флюа-
рида, алюминия, меди,
серебра

Наименование пластмассы	Наполнитель	Характеристика материала	Метод переработки	Область применения
Эпоксидная смола ЭД-5, ЭД-6	Отвердители: гексаметилен, диамид Пластификаторы: дибутилфталат, трикрезилфталат и др.	Процесс затвердевания сопровождается изменением свойств. Отвердевшая смола без наполнителя и пластификатора представляет собой хрупкий материал с высоким линейным расширением. Смолы с наполнителем и пластификатором носят название компаунды. Эпоксидные компаунды в отвержденном состоянии обладают высокой механической прочностью, бензо- и водостойкостью. Ограниченно устойчивы к амиаку. Неустойчивы к ацетону, бензолу. Свойства: $\gamma = 1200 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_v = 80 \text{ Н/мм}^2$; теплостойкость до 120°C ; температура разложения — 340°C	Отверждение с помощью отвердителей	Связующие для различных наполнителей, для ремонта деталей сельскохозяйственных машин, клеи, элементы облицовки
Волокнит	Асбестоволокно	Высокие фрикционные свойства	Прессование при 185°C	Тормозные колодки, диски
Слоистые пластмассы (гетинакс)	Бумага	Свойства: $\gamma = 1300 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_v = 80 \dots 200 \text{ Н/мм}^2$; теплостойкость до 160°C	Прессование заготовок пропитанного наполнителя при $150 \dots 160^\circ\text{C}$	Прокладки, панели, электронизоляционный материал
Текстолит	Хлопчатобумажная ткань	Высокие антифрикционные свойства: $\gamma = 1300 \text{ кг/м}^3$; $\sigma_v = 60 \dots 160 \text{ Н/мм}^2$; теплостойкость до 150°C	Прессование заготовок пропитанного наполнителя при $155 \dots 165^\circ\text{C}$	Шестерни, втулки, кольца, подшипники скольжения, детали электрооборудования

Преобразователи — дисперсные вещества, способные под влиянием нагрева или других факторов переходить в газообразное состояние и образовывать поры в пластмассах.

Достоинством пластических масс является сравнительно небольшая трудоемкость переработки их в изделия. Существуют несколько способов получения изделий из пластмасс. Наиболее широко используют экструзионное формование, литье под давлением, прессование, вальцевание.

Экструзионное формование используют для изготовления из термопластичных материалов пленок, листов, труб и различных профилей. Процесс осуществляют на специальных червячных прессах-экструдерах. Материал в виде порошка или гранул подают через бункер в обогреваемый цилиндр червячного пресса. Находящийся в цилиндре шнек, вращаясь, захватывает материал, перемешивает его, уплотняет и подает к оформляющей головке. При прохождении по цилиндру материал нагревается от его стенок до состояния текучести. Масса выходит через оформляющую головку и попадает в приемное устройство, где охлаждается воздухом или водой. Конфигурация профилированных изделий определяется конструкцией головки экструдера.

Литье под давлением используют для получения деталей различной конфигурации. Этот способ является одним из самых распространенных при переработке пластмасс. Литьем под давлением формуют обычно термопластичные материалы (полиэтилен, полиамиды, полистирол, винипласт и др.). Исходный материал из бункера через дозатор поступает в обогреваемый цилиндр. Нагретая до вязкотекучего состояния смесь подается поршнем в полость пресс-формы. После кратковременной выдержки (1...2 мин) пресс-форма раскрывается и из нее извлекают готовое изделие.

Формование изделий литьем под давлением является высокопроизводительным и экономичным способом. Он весьма широко используется при ремонте сельскохозяйственной техники.

Горячее прессование (формование в пресс-формах) в основном применяют для изготовления изделий из терморезистивных пластмасс. Различают прямое и литьевое прессование. При прямом прессовании навеска пресс-массы загружается непосредственно в оформляю-

щую полость пресс-формы и прилагаемое к массе давление развивается сразу в этой же полости. При литьевом прессовании навеска загружается сначала в промежуточную камеру (тигель), оттуда она передавливается в оформляющую полость.

Штамповку деталей из пластмасс применяют для изготовления изделий незамкнутого контура (стекла кабин, обтекатели, козырьки и др.) из листовых термопластов (винипласт, полиэтилен, органическое стекло).

Этот способ основан на способности термопластов переходить в высокоэластичное состояние при нагревании и затвердевать при охлаждении. Нагретый лист термопласта формуют в штампе или специальном приспособлении. Не снимая внешнего усилия, изделие охлаждают, фиксируя приданную ему форму. В зависимости от назначения, габаритов и формы изделия применяют два метода формования: метод направленной вытяжки и метод свободной вытяжки.

Изделия открытого типа (двери холодильников, тарелки, кюветы, корпуса приборов и машин) изготавливают на разнообразных формовочных машинах и прессах. Изделия закрытого типа с замкнутыми полостями изготавливают на выдувных машинах и специальных прессах. Наиболее эффективными по производительности и экономичности являются машины ротационного вакуумного формования, позволяющие обеспечить точность и непрерывность работы.

Вальцевание применяют для получения тонких пленок из пластмасс. Однородную смесь, нагретую до 150... 165 °С, пропускают через специальные многовалковые машины. Тщательно отполированные валки устанавливают с одинаковым зазором по всей длине.

§ 2. Древесные материалы

Древесина как конструкционный материал имеет ряд преимуществ и недостатков. Ее преимуществом является малая плотность, высокая механическая прочность на единицу массы, способность воспринимать ударную нагрузку благодаря упругости, высокие теплоизоляционные свойства, простота обработки при изготовлении деталей. К недостаткам древесины относится горючесть, гигроскопичность, анизотропность строения. В таблице 13 приведены свойства промышленной древесины.

13. Свойства промышленной древесины

Вид древесины	Плотность, г/см ³	Коэффициент усушки, %			Предел прочности (Н/мм ²) при					Твердость НВ			
		радиальный	тангенциальный	объемный	сжатия вдоль волокон	статическом изгибе	растяжения вдоль волокон	радиальном скалывании вдоль волокон	тангенциальном скалывании вдоль волокон	Прочность при ударном изгибе, Н·м/см ²	топочная	радиальная	тангенциальная
Береза	0,64	0,28	0,34	0,64	46,7	96,7	161,0	8,5	10,2	0,045	423	336	300
Бук	0,68	0,18	0,35	0,55	47,4	95,3	117,8	10,6	13,2	0,039	556	394	403
Вяз	0,66	0,17	0,33	0,52	40,4	83,9	—	8,3	9,3	0,045	512	385	384
Граб	0,81	0,24	0,35	0,61	53,1	121,1	134,7	14,1	17,7	0,048	825	701	717
Дуб	0,76	0,18	0,28	0,48	51,9	89,1	—	11,0	12,5	0,046	653	536	568
Липа	0,50	0,23	0,33	0,58	39,8	77,5	115,8	7,8	7,4	0,028	234	156	163
Ольха	0,53	0,17	0,30	0,49	38,7	70,9	96,3	7,4	9,1	0,025	367	248	264
Осина	0,50	0,15	0,30	0,47	37,4	68,6	120,1	5,7	7,8	0,041	241	175	183
Сосна	0,51	0,18	0,31	0,51	41,4	75,8	100,9	6,9	6,7	0,020	262	217	223
Ясень	0,69	0,19	0,31	0,52	49,9	108,3	139,0	12,6	12,2	0,043	732	534	609

Древесину, используемую в качестве исходного материала в производстве, подразделяют на круглую и пиломатериалы. Круглые лесоматериалы представляют собой очищенные от сучьев, а часто и от коры, отрезки древесных стволов. Их размеры записывают двумя цифрами со знаком умножения между ними. Первая цифра обозначает длину в метрах, вторая — диаметр в сантиметрах верхнего (более тонкого) торца без коры.

Круглый лес имеет следующие разновидности: *бревна* — стволы деревьев, имеющие в верхней части толщину более 150 мм; *кряжи* — нижняя толстая часть ствола, составляющая около трети его длины; *слег* — тонкие бревна толщиной в верхней части 80...150 мм; *жерди* — тонкие стволы толщиной в верхней части 60...80 мм.

Пиломатериалы получают при распилке круглых лесоматериалов на пластины, доски, бруски, двухкатные брусья, четырехкатные брусья, горбыли и др.

Пластины — бревна, распиленные пополам вдоль оси, *лежни* — бревна, опиленные с двух сторон, *брусья* — бревна с квадратным или прямоугольным поперечным сечением, опиленные с четырех сторон. Пиленый лес состоит из *досок*, получающихся при продольной распилке бревен. Крайние доски, выпуклые с одной стороны, называются *горбылями*.

Одним из распространенных полуфабрикатов является *шпон* — тонкий слой древесины, используемый для изготовления фанеры или для отделочных работ.

В зависимости от способа изготовления различают три вида шпона: пиленный, строганый и лущеный. Пиленый шпон толщиной 0,8...2 мм получают продольной распилкой кряжей из березы, ольхи, клена. Его применяют для отделки поверхностей, подвергаемых зеркальной полировке.

Строганый шпон получают продольным строганием тонких полос на фанерострогальных станках из предварительно распаренных кряжей.

В машиностроении используют преимущественно лущеный шпон, который получают на специальных станках, снимающих широкую ленту с вращающегося кряжа длиной до 1,5 м. Толщина лущеного шпона — 0,5...1,5 мм.

Фанерой называют листовой материал, состоящий из нескольких склеенных между собой слоев лущеного

шпона, изготовленного из лиственных (береза, ольха) или хвойных (сосна) пород древесины. Клееную фанеру изготавливают трех марок:

ФС — фанера повышенной водостойкости, клеенная фенолоформальдегидными клеями;

ФК — фанера средней водостойкости, клеенная карбамидными клеями;

ФБА — фанера, клеенная альбумидно-казеиновыми клеями.

Кроме этого, выпускают фанеру специального назначения: авиационная, бакелизированная, декоративная, строганая, армированная, металлизированная и др.

Толщина обычной фанеры составляет 1,5...12 мм. Для изготовления деталей машин, подвергающихся значительной силовой нагрузке, применяют многослойную и плиточную фанеру. Плиточная фанера состоит из одиннадцати и более слоев шпона, ее толщина 25...30 мм.

Деревянные детали для сельскохозяйственных машин подразделяют на три группы: 1 — наиболее ответственные детали, работающие при повышенных динамических нагрузках, и детали, ослабленные вырезами, пазами, отверстиями и др.; 2 — детали, подвергающиеся динамическим и значительным статическим нагрузкам; 3 — менее ответственные детали, подвергающиеся статическим нагрузкам.

§ 3. Древпласты

Материалы, состоящие из древесины и синтетических смол, называют *древпластами*. В последнее время они находят все большее применение и вытесняют древесные и некоторые другие конструкционные материалы. На практике широко используют следующие древпласты: фенольные пресс-порошки, прессовочные древесные массы (МДП) и древесные слоистые пластики (ДСП).

Свойства древпластов определяются их составом, структурой и технологией получения. Основными из них являются: плотность, прочность, деформируемость, теплоемкость, водостойкость.

Плотность древпласта или готового изделия из него колеблется в весьма широких пределах и составляет 0,009...2,2 г/см³. Это зависит от вида связующего компонента и наполнителя.

Прочность древесных пластов существенно зависит от ориентации и размеров частиц древесины. Минимальные значения разрушающего напряжения при растяжении наблюдаются в направлении, перпендикулярном направлению расположения однонаправленных, ориентировочных древесных волокон, в которые в качестве связующего введен пенопласт. При введении полистирольного пенопласта марки ПСБ-С с плотностью $0,02 \text{ г/см}^3$ разрушающее напряжение древесного пласта $\sigma_{\text{в}} = 11 \text{ Н/см}^2$, а при испытаниях древесного пласта ДСП-А $\sigma_{\text{в}} = 32250 \text{ Н/см}^2$.

Деформируемость древесных пластов, особенно при растяжении вдоль волокон, исследована еще недостаточно. Однако можно полагать, что относительное удлинение древесных пластов колеблется в пределах от 0,6 до 3,8% в зависимости от положения волокон древесины и содержания наполнителя в материале. Малая деформируемость древесных пластов определяется малыми деформациями связующего и наполнителя.

Теплоемкость древесных пластов — это сумма теплоемкостей входящих в них компонентов. Из-за значительной анизотропии теплофизических свойств древесины вдоль и поперек волокон теплоемкость изменяется в широких пределах.

Водостойкость — одно из важнейших свойств древесных пластов. Она характеризуется водопоглощением, влагопоглощением, разбуханием, формоустойчивостью. От водостойкости древесных пластов зависят такие свойства, как влажность и усушка.

Основными факторами, определяющими водопоглощение древесных пластов, являются: содержание связующего в древесном пласте, химикотермическая, механическая обработка и дисперсность наполнителя, плотность древесного пласта, введение гидрофобных добавок в древесный пласт и водостойкость связующего. Таким образом, регулируя состав древесных пластов, можно управлять водопоглощением, а следовательно, влагопоглощением, разбуханием и формоустойчивостью.

Рассмотренные теоретически обоснованные диапазоны изменения свойств древесных пластов позволяют потребителям выбирать древесные пласти или изделия из них с необходимыми параметрами. Возможности направленного изменения свойств (управление свойствами) древесных пластов очень велики при сохранении главного их преимущества — низкой себестоимости.

Наиболее часто используют следующие марки древесных пластов: 04-010-012, 03-010-02, У4-080-02, МДПС-А, МДПК-В, МДПВ-А, ДСП-Б, ДСП-В-Э, ДСП-Г.

В сельскохозяйственном машиностроении и при ремонте применяют все виды древесных пластов. Их можно встретить в жатках ЖВН-6, ЖВН-10, ЖБ-4,6, где из МДП изготавливают шкивы, башмаки, крышки подшипников, поддерживающие ролики, втулки. В силосоуборочных комбайнах КС-2,6 применяют клиноременные шкивы, крышки, фланцы, вкладыши из МДП. В зерноуборочных комбайнах, выпускаемых тульским комбайновым заводом, используют шкивы, крышки, ролики, втулки из МДПО; в кукурузоуборочных комбайнах — втулки, подшипники скольжения, шкивы из МДПК-А и МДПК-Б. В кормовых универсальных дробилках КДУ-2,0 используют рампорные втулки дисков и редуктора, а также корпуса магнитных сепараторов.

В унифицированных ленточных транспортерах легкого, среднего и тяжелого типов в желобчатых, плоских и дефлекторных роликах используют корпуса подшипников, вкладыши, стаканы и уплотнения из МДПК-В₃ и МДПК-В₄. В кранах различных типов из МДП изготавливают втулки опорных катков, сухари поворотных устройств, распорные втулки, крышки, из фенольных пресс-порошков — направляющие ролики, шаровые головки, клеммовые гайки, крышки и многие другие детали.

Перерабатывать древесные пластины в изделия можно следующими методами: прессованием при высоком давлении, литьем под давлением, литьем без давления (заливка), экструзией, пневматическим формованием, намоткой (фанерные трубы).

В большинстве случаев процесс получения изделий из древесных пластов сопровождается их нагревом. Теплопроводность древесных пластов невысока, поэтому при их переработке очень важно так организовать подвод тепла, чтобы максимально интенсифицировать процессы нагрева изделия и отверждения связующего.

МДП перерабатывают в изделия в основном методом прямого прессования. Прессуют обычно при температуре формы 140...170°C, при давлении 40...60 МПа (для сложных изделий давление до 100 МПа).

По аналогии с переработкой прессовочных фенольных и древесных масс способ изготовления ДСП может быть назван эмульсионным, так как пропитка древесно-

го наполнителя осуществляется в жидких резольных смолах.

Обычно детали из ДСП изготавливают механической обработкой. При этом необходимо учитывать положение низкодисперсных древесных частиц относительно обрабатываемой поверхности и так выбирать направление резания, чтобы свести к минимуму возможность выкрашивания кромок деталей под действием сил резания.

Большое влияние на резание древесных пластов оказывают их теплофизические свойства. Теплопроводность древесных пластов в 170...360 раз ниже теплопроводности стали. Коэффициент линейного расширения в зависимости от направления волокон в древесном пласте колеблется от значений в 3 раза меньших, чем у стали, до значений в 2,8 раза больших. Удельная теплоемкость древесных пластов в 2,9...5,2 раза больше теплоемкости стали. Поскольку плотность деталей из фенольных пресс-порошков, МДП и ДСП составляет 1,25...1,45 г/см³, а плотность металлов значительно выше (у стали 7,85 г/см³), то значения удельной объемной теплоемкости следующие: для древесных пластов — от 1,8 до 3,1 Дж/см³·К, для стали — 3,6 Дж/см³·К. Если к равным объемам древесного пласта и стали подвести одинаковые количества теплоты, то температура древесного пласта будет выше.

Таким образом за счет разницы в коэффициентах теплопроводности стали и древесных пластов теплота, передаваемая инструменту при резании, составляет от 99,4 до 99,7% всей выделяемой теплоты, а остальная ее часть отводится в древесный пласт.

Режущих инструментов, оборудования и специальных технологических процессов для обработки древесных пластов почти нет. Часто используют инструмент, сконструированный для обработки металлов или древесины. Этим обусловлены некоторые трудности эффективной обработки древесных пластов резанием, усугубляемые многообразием типов и марок древесных пластов.

При выборе марки древесного пласта для замены изношенной металлической детали при ремонте машин необходимо учитывать:

особенности воздействия нагрузок, влияющие на зависимости между напряжениями и деформациями, между напряжениями и скоростями приложения нагрузок,

между прочностью и направлением волокон в древесном наполнителе;

особенности воздействия влаги, влияющие на зависимости между прочностью и влажностью древесных слоев, между влажностью и разбуханием, между влажностью и формоизменяемостью (все эти зависимости определяются с учетом направления волокон древесного наполнителя);

особенности изменения температуры, влияющие на зависимость между температурами и коэффициентами линейного и объемного расширения древесных слоев, между температурами и прочностью, между температурами и теплофизическими свойствами.

Учет этих особенностей осложняет изготовление деталей, но может быть оправдан высокой технико-экономической эффективностью применения древесных слоев.

Общие деформации древесных слоев под нагрузками невелики, релаксация напряжений незначительна, явление хладотекучести не наблюдается. Чем больше частиц древесного наполнителя имеет расположение волокон вдоль направления приложения нагрузки, тем больше прочность и меньше удлинение древесного слоя при растяжении. По изменению прочности при различных скоростях деформации древесные слои занимают промежуточное положение между металлами и пластмассами.

С увеличением влажности древесных слоев их прочность уменьшается, разбухание увеличивается, в ряде случаев наблюдается изменение геометрических параметров деталей. Для образцов из древесных слоев марки МДПО разбухание по толщине составляет 45...60% от значения водопоглощения. При увеличении влажности возрастает электро- и теплопроводность древесных слоев.

При изменении температуры характер изменения свойств древесных слоев значительно ближе к металлам, чем к пластмассам.

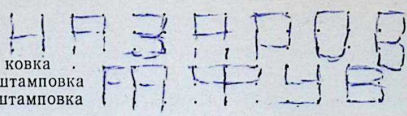
ЛИТЕРАТУРА

- Гуляев А. П. *Металловедение*. — М.: *Металлургия*, 1978.
- Казачков Н. Ф., Осокин А. М., Шишкова А. П. *Технология металлов и других конструкционных материалов*. — М.: *Металлургия*, 1976.
- Кондратьев Е. Т. *Атлас типовых микроструктур*. — Волгоград: *Волгоградский СХИ*, 1981.
- Кондратьев Е. Т. *Термическая обработка в ремонтном деле*. — Волгоград: *Н.-Волжское кн. изд-во*, 1971.
- Лахтин Ю. М. *Металловедение и термическая обработка металлов*. — М.: *Металлургия*, 1979.
- Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. *Материаловедение*. — М.: *Машиностроение*, 1980.
- Литейное производство*. Под ред. И. Б. Куманина. — М.: *Машиностроение*, 1971.
- Машиностроительные материалы*. Под ред. В. М. Раскатова. — М.: *Машиностроение*, 1980.
- Охрименко Я. М. *Технология кузнечно-штампового производства*. — М.: *Машиностроение*, 1976.
- Практикум по технологии конструкционных материалов и материаловедению*. Под ред. С. С. Некрасова. — М.: *Колос*, 1978.
- Соколов И. И. *Газовая сварка и резка металлов*. — М.: *Высшая школа*, 1978.
- Справочник металлиста*, т. 1 под ред. С. А. Чернавского и В. Ф. Решикова; т. 2 под ред. А. Г. Рахштадта и В. А. Бромстрема; т. 3 под ред. А. Н. Малова; т. 4 под ред. М. П. Новикова и П. Н. Орлова; т. 5 под ред. Б. Л. Богуславского. — М.: *Машиностроение*, 1976, 1977, 1978.
- Технология металлов и сварка*. Под ред. П. И. Полухина. — М.: *Высшая школа*, 1977.
- Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлонием*. Под ред. Б. Е. Патона. — М.: *Машиностроение*, 1974.
- Хренов К. К. *Сварка, резка и пайка металлов*. — М.: *Машиностроение*, 1973.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ	
ОСНОВЫ ПРОИЗВОДСТВА ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ . .	5
Глава I. Общие сведения о металлах	5
§ 1. Классификация металлов	5
§ 2. Атомно-кристаллическое строение металлов	6
§ 3. Строение реальных кристаллов	8
§ 4. Плавление и первичная кристаллизация	10
§ 5. Строение металлического слитка	12
§ 6. Аллотропические превращения	14
§ 7. Магнитные превращения	15
Глава II. Производство черных и цветных металлов . .	16
§ 1. Выплавка чугуна	16
§ 2. Производство стали	20
§ 3. Прямое восстановление железа из руд	30
§ 4. Производство алюминия и меди	30
РАЗДЕЛ ВТОРОЙ	
ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	34
Глава I. Изготовление литейных форм	34
§ 1. Литейный модельный комплект	34
§ 2. Формовочный инструмент	37
§ 3. Формовочные и стержневые смеси	37
§ 4. Технология изготовления литейных форм и стержней	41
§ 5. Литниковая система	46
Глава II. Получение жидкого металла и отливок . . .	47
§ 1. Плавление шихтовых материалов	47
§ 2. Литейные материалы	50
§ 3. Заливка форм и получение отливок	53
Глава III. Специальные способы литья	54
§ 1. Литье в металлические формы	54
§ 2. Центробежное литье	55
§ 3. Литье под давлением	55
§ 4. Литье по выплавляемым моделям	56
§ 5. Литье в оболочковые формы	58
Глава IV. Контроль производства отливок и их дефекты	60
РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ	
ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	62
Глава I. Общие сведения	62
§ 1. Теоретические основы обработки металлов давлением	62
§ 2. Влияние некоторых факторов на процесс обработки давлением	65
§ 3. Нагрев металла и нагревательные устройства	67

Глава II. Способы обработки	70
§ 1. Прокатка	70
§ 2. Волочение	73
§ 3. Прессование	74
§ 4. Свободная ковка	75
§ 5. Объемная штамповка	79
§ 6. Листовая штамповка	82



РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ 84
СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО 84

Глава I. Классификация и характеристика способов сварки 84

§ 1. Физическая сущность процессов, протекающих при сварке	84
§ 2. Классификация способов сварки	85
§ 3. Виды сварных соединений и швов	87
§ 4. Строение сварного шва	89

Глава II. Электродуговая сварка 90

§ 1. Металлургические процессы при сварке	90
§ 2. Свойства электрической сварочной дуги	92
§ 3. Источники питания сварочной дуги	95
§ 4. Технология ручной электродуговой сварки	99
§ 5. Электроды для дуговой сварки и наплавки	102
§ 6. Автоматическая и полуавтоматическая электродуговая сварка и наплавка	107
§ 7. Контактная сварка	113

Глава III. Специальные виды сварки 114

§ 1. Холодная сварка	114
§ 2. Сварка взрывом	115
§ 3. Ультразвуковая сварка	117
§ 4. Сварка трением	118
§ 5. Диффузионная сварка	119
§ 6. Сварка электронным лучом	120
§ 7. Сварка под водой	122

Глава IV. Газовая сварка и резка металлов 123

§ 1. Применяемые материалы	123
§ 2. Оборудование	126
§ 3. Технология сварки и резки	136

Глава V. Особенности сварки различных металлов и сплавов 140

§ 1. Свариваемость металлов	140
§ 2. Сварка чугуна	141
§ 3. Сварка меди и ее сплавов	143
§ 4. Сварка алюминия и его сплавов	144
§ 5. Сварка легированных сталей	146
§ 6. Напряжения и деформации при сварке	148
§ 7. Дефекты сварных соединений	148

РАЗДЕЛ ПЯТЫЙ 151
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ 151

Глава I. Основы теории сплавов 151

§ 1. Фазы в металлических сплавах	151
§ 2. Правило фаз Гиббса	154

§ 3. Основные типы диаграмм состояния сплавов	155
Глава II. Железо и его сплавы	161
§ 1. Свойства железа и углерода	161
§ 2. Фазы и структурные составляющие в железоуглеродистых сплавах	162
§ 3. Диаграмма состояния железа — цементит	164
Глава III. Углеродистые стали	170
§ 1. Влияние углерода и постоянных примесей на свойства стали	170
§ 2. Классификация и маркировка углеродистых сталей	171
Глава IV. Чугуны	175
§ 1. Графитизация чугуна	175
§ 2. Белый чугун	176
§ 3. Серый чугун	177
§ 4. Высокопрочный чугун	179
§ 5. Ковкий чугун	180
§ 6. Чугун с особыми физическими свойствами	181
Глава V. Фазовые превращения в сплавах железа с углеродом	182
§ 1. Превращения в стали при нагреве	182
§ 2. Превращение переохлажденного аустенита	184
§ 3. Превращение аустенита при непрерывном охлаждении	188
§ 4. Превращение мартенсита и остаточного аустенита при нагреве	190
Глава VI. Технология термической обработки стали	191
§ 1. Общие сведения	191
§ 2. Отжиг	192
§ 3. Нормализация	195
§ 4. Закалка	195
§ 5. Отпуск	202
§ 6. Обработка холодом	203
§ 7. Термомеханическая обработка	204
§ 8. Дефекты, возникающие при термической обработке	205
Глава VII. Химико-термическая обработка стали	206
§ 1. Физические основы	206
§ 2. Цементация	208
§ 3. Азотирование	211
§ 4. Цианирование	211
§ 5. Диффузионная металлизация	212
Глава VIII. Легированные стали и сплавы с особыми свойствами	214
§ 1. Легирующие элементы в сплавах железа с углеродом	214
§ 2. Классификация и маркировка легированных сталей	216
§ 3. Конструкционные легированные стали	219
§ 4. Электротехнические металлы и сплавы	222
§ 5. Износостойкая аустенитная сталь	225
§ 6. Нержавеющие стали	226
§ 7. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами	228

Глава IX. Инструментальные стали	229
§ 1. Стали для режущих инструментов	229
§ 2. Стали для измерительных инструментов	233
§ 3. Штамповые стали	234
Глава X. Цветные металлы и сплавы	238
§ 1. Медь и ее сплавы	238
§ 2. Алюминий и его сплавы	241
§ 3. Антифрикционные сплавы на основе алюминия, олова, свинца и цинка	245
§ 4. Титан и его сплавы	248
Глава XI. Порошковые материалы	249
§ 1. Производство порошковых сплавов	249
§ 2. Металлокерамические твердые сплавы	251
§ 3. Наплавочные твердые сплавы	252
§ 4. Минералокерамические твердые сплавы	253
Глава XII. Неметаллические материалы	254
§ 1. Пластические массы	254
§ 2. Древесные материалы	260
§ 3. Древпласты	263
Литература	268

Евгений Тимофеевич Кондратьев

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Заведующая редакцией *А. И. Гераськина*

Редактор *А. Б. Курзин*

Художественный редактор *А. И. Бершачевская*

Технический редактор *Н. В. Суржева*

Корректоры: *А. И. Болдуева, Г. В. Абатурова, Г. А. Данилова*

ИБ № 3120

Сдано в набор 01.12.82. Подписано к печати 24.01.83. Т-00323. Формат 84×108^{1/32}. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 14,28+4 вкл.+0,21 форзац. Усл. кр.-отт. 15,12. Уч.-изд. л. 15,05+0,4 форзац. Изд. № 151. Тираж 25 000 экз. Заказ № 763. Цена 80 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Колос», 107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спаская, 18.

Московская типография № 11 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. Москва, 113105, Нагатинская ул., д. 1.

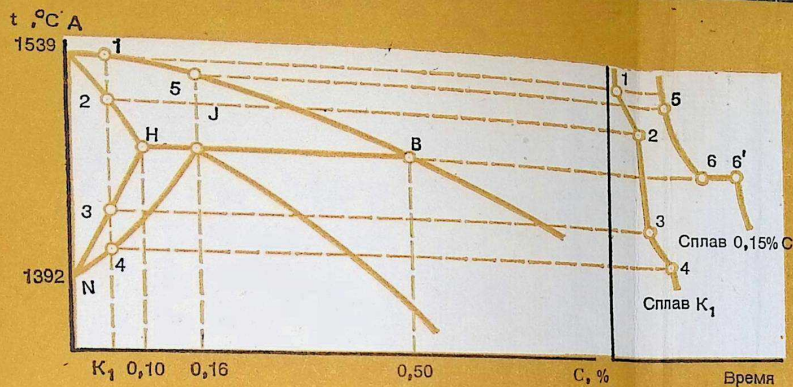


Рис. 5.12. Часть диаграммы состояния Fe-C. Первичная кристаллизация малоуглеродистых сплавов.

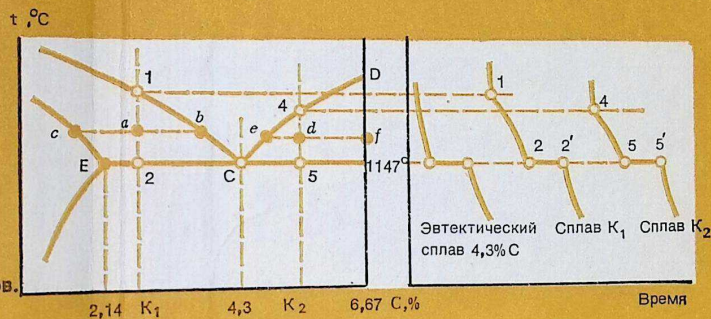


Рис. 5.13. Часть диаграммы состояния Fe-C. Первичная кристаллизация высокоуглеродистых сплавов.

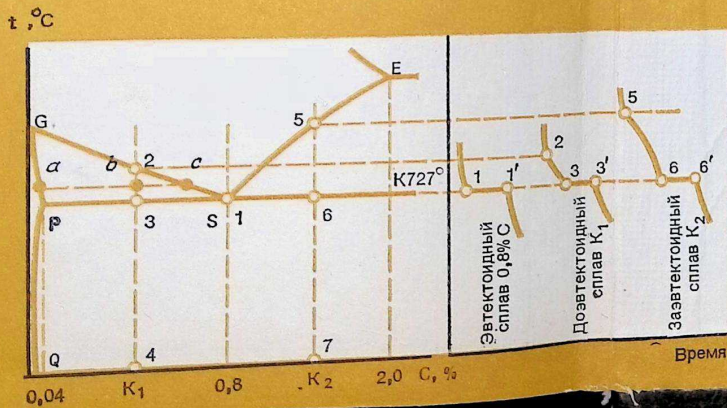


Рис. 5.14. Часть диаграммы состояния Fe-C. Вторичная кристаллизация сталей.

