

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Р. Заббаров

**Технология конструкционных материалов.
Курс лекций**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2012

Авторы: **Заббаров Рахим**

Заббаров, Р. Технология конструкционных материалов. Курс лекций [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Р. Заббаров; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (3,82 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

В учебном пособии рассмотрены процессы выплавки металлов и сплавов от шихты до товарной продукции, изложены основы технологии процессов порошковой металлургии и ОМД, физико-химические основы повышения качества металлов и сплавов. Приведены основы литейного производства. Изложены некоторые сведения по нанотехнологии в металлургии, металлообработке и материаловедении.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров по направлению 150400.62 «Металлургия», магистерская программа «Обработка металлов давлением» по дисциплине «Технология конструкционных материалов» в 4 семестре.

Учебное пособие разработано на кафедре технологии металлов и авиационного материаловедения.

©Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ

1. МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ
 - 1.1. Шихтовые материалы металлургического производства
 - 1.2. Производство чугуна
 - 1.3. Прямое получение железа
 - 1.4. Производство стали
 - 1.5. Производство алюминия
 - 1.6. Производство магния
 - 1.7. Производство титана
 2. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ
 - 2.1. Способы получения порошков и их соединений
 - 2.2. Формирование порошков
 - 2.3. Упрочнение пористых изделий
 3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ
 - 3.1. Общие теоретические сведения
 - 3.2. Прокатка
 - 3.3. Волочение
 - 3.4. Прессование
 - 3.5. Кузнечно-штамповочное производство
 4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ
ПРОИЗВОДСТВА СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ ОТВЕТСТВЕННОГО
НАЗНАЧЕНИЯ
 - 4.1. Процессы при плавке в вакууме
 - 4.2. Обработка расплавов
 - 4.3. Переплавные процессы («спецметаллургия»)
 - 4.4. Внепечная обработка металла («ковшовая» металлургия)
 - 4.5. Фильтрация расплавов
 5. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО
 - 5.1. Общие сведения
 - 5.2. Структура и строение металлических расплавов
 - 5.3. Технологические литейные свойства металлов и сплавов
 - 5.4. Литье в разовые песчаные формы
 - 5.5. Литье в керамические формы
 6. ОТДЕЛКА И КОНТРОЛЬ ОТЛИВОК
 7. НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ, МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ
- БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное машиностроение требует применения материалов с высоким комплексом физико-механических и технологических свойств. Материалы ответственного назначения (аэрокосмическая, судостроительная и другие отрасли) можно получать с помощью современных технологий металлообработки. В учебной литературе недостаточно освещены современные технологические процессы обработки металлов. Основой всех последних технологических разработок являются традиционные («старые») технологии. Поэтому в пособии изложены как классические технологии, так и инновационные, в частности нанотехнологии в металлургии, металлообработке и материаловедении.

В главе 1 рассмотрены процессы выплавки металлов и сплавов от шихты до товарной продукции.

В главах 2 – 3 изложены основы технологии процессов порошковой металлургии и ОМД.

В главе 4 рассмотрены физико-химические основы повышения качества металлов и сплавов.

В главах 5 – 6 приведены основы литейного производства. В главе 7 изложены некоторые сведения по нанотехнологии в металлургии, металлообработке и материаловедении.

1. МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

1.1. Шихтовые материалы металлургического производства [1, 2]

Для приготовления металлов и сплавов заданного химического состава применяют исходные материалы. Такие материалы называются шихтовыми или шихтой. В состав шихтовых могут входить следующие материалы [1, 2]: рудные и нерудные материалы, отходы производства, первичные материалы, подготовительные сплавы (ферросплавы и лигатуры), флюсы и модификаторы.

Сырьевую базу металлургии представляют топливо, огнеупоры, руды и флюсы.

Топливо

Служит для разогрева и расплавления шихтовых материалов. В состав топлив входят горючие компоненты (углерод, водород, сера, углеводороды), негорючие (зола), влага.

По агрегатному состоянию различают твердое, жидкое и газообразное топливо.

По степени подготовки топливо делится на естественное и искусственное.

Твердое топливо

Естественное – это древесина, уголь, торф.

Искусственное – кокс, древесный уголь, пылевидное топливо.

Важнейшим из них является кокс – основное топливо доменных печей. Кокс получают нагревом углей без доступа воздуха при температуре 1100 - 1200°C. Кроме кокса, при этом получают горючий коксовый газ, а также ценные химические продукты: бензол, толуол, смолы.

Жидкое топливо

Естественное – это нефть.

Искусственное: продукты переработки нефти – мазут, лигроин, смолы.

Газообразное топливо

Естественное – природный газ.

Искусственное – коксовый газ, доменный газ, смесь доменного и коксового газа, генераторный газ и другие.

Огнеупоры

Служат для строительства и футеровки плавильных агрегатов, нагревательных устройств, ковшей, тиглей, желобов и других устройств. Огнеупоры – это окислы химических элементов.

По химическому составу огнеупоры делятся на кислые (SiO_2), основные (CaO , MgO и др.) и амфотерные (Al_2O_3 , Cr_2O_3).

В зависимости от физико-химической природы исходных материалов все отечественные огнеупоры делят на классы: кремнезёмистые, алюмосиликатные, магнезиальные, хромистые, цирконийсодержащие, углеродистые, специальные окисные, карбидные и нитридные (карборундовые).

В зависимости от химического состава огнеупоров печи бывают кислые и основные, процессы, проводимые в них, кислые и основные и например, кислый мартеновский, основной электродуговой и др. процессы.

В печах кроме основного продукта, получают и шлаки, которые по химическому составу также бывают – кислые и основные.

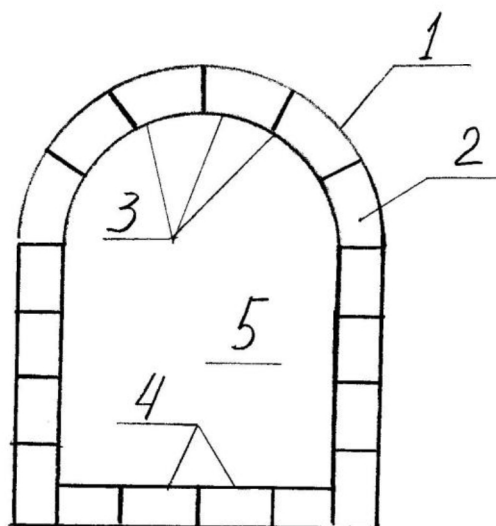


Рис. 1. Принципиальная схема печи: 1 – металлический кожух, 2 – футеровка (кладка), 3 – свод, 4 – под, 5 – рабочее пространство.

Флюсы

Их назначение зависит от цели металлургического производства. Так, в доменных печах флюсы служат для перевода пустой породы и золы кокса в шлак.

По химическому составу различают флюсы кислые, основные и глинозёмистые.

Отечественные железные руды имеют кислую, пустую породу, поэтому применяют основные флюсы (известняк CaCO_3). В печи он разлагается по реакции



В современных доменных печах известняк в чистом виде не вводят, а применяют офлюсованный агломерат (это спеченная железная руда совместно с известняком).

Руда

Это горная порода, из которой экономически целесообразно извлекать металлы и их соединения. Экономическая целесообразность определяется содержанием извлекаемых элементов и характеризуется величиной браковочного предела.

Руды называют по назначениям извлекаемых элементов: железные, медные, медно-никелевые, полиметаллические и др.

По составу минералов руды бывают окисленные, сульфидные и др.

1.2. Производство чугуна [1,2]

Чугун – это железоуглеродистый сплав, содержащий более 2,14 % углерода. В состав чугунов входят также постоянные примеси (кремний, марганец) и вредные примеси (сера, фосфор). Сера придает сталям красноломкость, т.е. хрупкость при повышенных температурах, а также ухудшает литейные свойства чугунов. Фосфор придает сталям

хладноломкость, т.е. хрупкость при пониженных температурах, но повышает литейные свойства чугуна.

Чугуны получают в различных плавильных агрегатах, но главным предводителем является доменная печь. Основным продукт плавки в доменных печах – это перепельный чугун, который является главным продуктом черной металлургии. Этот чугун идет на производство стали. Он содержит около 3,8 – 4,0 % углерода.

В состав шихты доменной печи могут входить руда, известняк, офлюсованный агломерат, кокс.

Современная доменная печь – это печь шахтного типа с характерным профилем [1].

Профиль – это внутреннее очертание пространства печи.

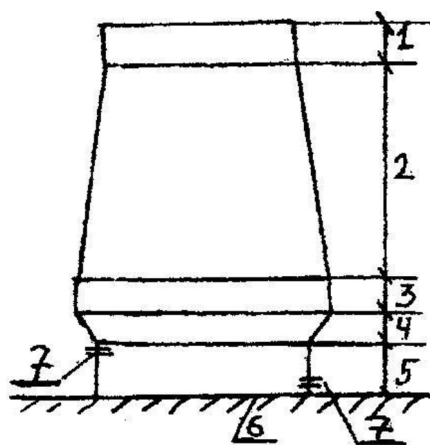


Рис. 2. Профиль доменной печи: 1 – колошник, 2 – шахта, 3 – распар, 4 – заплечики, 5 – горн, 6 – лещади, 7 – влётки.

Шихта загружается сверху через колошник и движется вниз навстречу газовому восстановительному потоку. Протекают процессы восстановления окислов, образование чугуна и шлака.

Кокс и шлак накапливаются в горне печи, здесь же находятся устройства (летки) для выпуска этих продуктов.

Обычно печи имеют одну или две шлаковые летки и одну чугунную летку.

Восстановительные процессы доменной плавки

Доменный процесс – это восстановительный процесс. В ходе плавки восстанавливаются железо, кремний, марганец, фосфор и растворяются в чугуне.

Восстановителями в печи являются газы (CO и H₂) и углерод C.

Восстановление газами называется косвенным и оно протекает до 800 – 900°C.

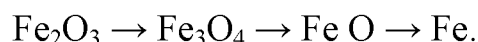
Восстановление углеродом называется прямым. Прямое восстановление начинается протекать с 1110°C.

Восстановление окислов железа идет по следующим стадиям:

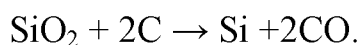
1. При $t < 570^\circ\text{C}$



2. При $t > 570^\circ\text{C}$



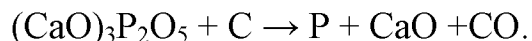
Восстановление кремния происходит по реакции:



Восстановление марганца осуществляется как окисью углерода, так и углеродом по схеме:



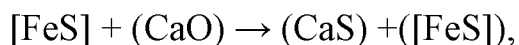
Восстановление фосфора протекает по реакции:



В условиях доменной плавки фосфор восстанавливается, растворяется в чугуне и, таким образом, фосфор из чугуна удалить нельзя.

Поведение серы

Серу переводят в соединения нерастворимые в чугуне, но растворимые в шлаке. Таким образом, серу переводят в шлак. Для этого необходимо сформировать высокоосновной шлак (CaO). Протекает реакция:



где скобки означают:

[] – элемент, соединения, растворимые в железе,

() – элемент, соединения, растворимые в шлаке.

Продукт доменной плавки

Основными продуктами доменного процесса являются:

1. Чугуны. Они бывают:

- пердеельные (для передела на сталь);
- литейные (производство фасонных отливо);
- специальные или доменные ферросплавы (доменный ферромарганец до 75% Mn, бедный перосилидий до 9 – 18 % Si, зеркальный чугун до 10 – 25 % Mn).

2. Доменные шлаки, в состав которых входят окислы различных элементов, главным образом, CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂, FeO и сульфид кальция CaS.

Шлаки применяют для производства цемента и других строительных материалов (шлаковата, шлакоблоки и т.д.).

3. Доменный (колошниковый) газ, в состав которого входят CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄ и др. Это ценный горючий газ с теплотой сгорания 850 – 950 ккал/м³. Смешивая коксовый и доменные газы получают смешанный газ, который является топливом для воздухонагревателей. Воздухонагреватели служат для нагрева холодного воздуха до 1000°C, после чего воздушное дутье подается в печь.

1.3. Прямое получение железа (ППЖ) [1, 2]

ППЖ – это такие химико-физические процессы, которые позволяют получить железо непосредственно из руды, минуя доменные процессы [1]. В зависимости от температуры процесса все способы ППЖ делят на три группы.

Способы получения губчатого железа. Температура до 1100°C. При этих температурах железо восстанавливается и принимает форму губки. Процесс идет без оплавления пустой породы, т.е. без образования шлака.

Способы получения кричного железа. Температура 1250 – 1350°C. Процесс ведут в трубчатых вращающихся печах. При этих температурах

частицы железа восстанавливаются между собой, образуя агломераты (крицы). При этом образуется тестообразный шлак с включенными крицами. После охлаждения продукт дробят и подвергают магнитной сепарации.

Способы получения жидкого металла. Чаще всего применяют комбинированные способы плавки: например, дуплекс-процесс (на 1-ой стадии руду восстанавливают в шахтных печах; на 2-ой – применяют электродуговые печи, где идут процессы плавления и легирования с целью получения стали заданного химического состава).

1.4. Производство стали [1, 3, 5]

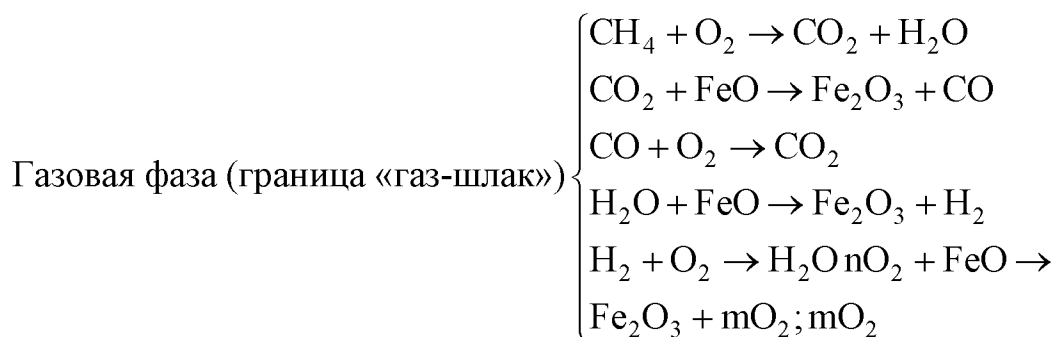
Сталь – это железоуглеродистый сплав, содержащий не менее 2,14 % углерода, а также постоянные примеси – кремний, марганец и вредные – сера и фосфор. Все стали классифицируют по различным признакам: составу, структуре, назначению и др.

Стали можно получать в конвертерах, мартенах, электропечах и САНДах (сталеплавильные агрегаты непрерывного действия). Обычно на практике применяют плавку с окислением и без окисления [1, 2].

Наиболее широко применяется плавка с окислением, когда кислород играет главную роль.

Перенос кислорода

Рассмотрим процесс переноса кислорода в печах, отапливаемых природным газом.



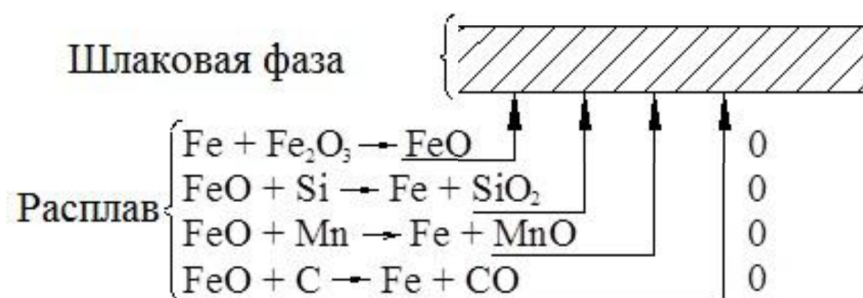
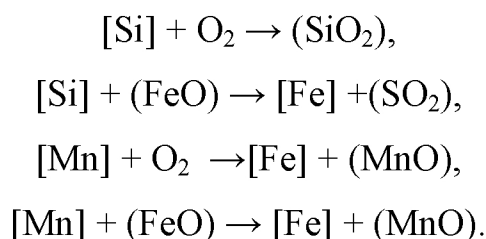


Рис. 3. Схема переноса кислорода при окислительной плавке

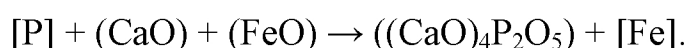
Окисление кремния и марганца

Осуществляется кислородом печной атмосферы и закисью железа (FeO) в шлаке по следующим реакциям:



Окисление фосфора и принципы дефосфорации стали

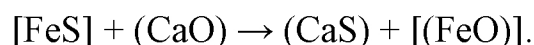
Фосфор окисляется по реакции:



Основными условиями дефосфорации являются высокая активность шлака, наличие закиси железа в шлаке, умеренные температуры. После дефосфорации фосфористый шлак скачивают.

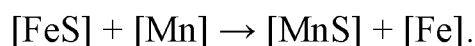
Удаление серы и принципы десульфурации стали

Сера удаляется по реакции:



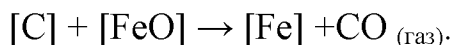
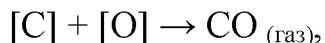
Основными условиями десульфурации являются высокая активность шлака, минимальное содержание FeO в шлаке, высокие температуры.

Фосфор удаляется на первых стадиях, а сера – на последних. Если сталь содержит марганец, то частично сера удаляется по реакции:



Окисление углерода и кипение ванны

Скорость протекания окислительных процессов зависит от величины контактной поверхности «шлак-металл». Величина этой поверхности резко увеличивается при кипении ванны. Кипение – результат окисления углерода и выделения пузырьков CO по реакциям:

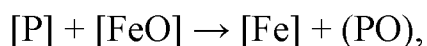
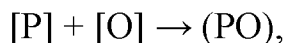


При кипении происходит перемешивание металла со шлаком, что приводит к выравниванию состава и температуры металла, удалению газов и облегчению всплытия неметаллических включений. Поэтому этот процесс является важнейшим при плавке с окислением. Весь период кипения делят на две части:

- рудное кипение («полировка»). В этом случае кипение идет за счет кислорода вводимых добавок;
- безрудное (чистое) кипение. Кипение за счет кислорода печной атмосферы и кислорода аккумулированного ванной.

Раскисление сталей

Кислород находится в стали, главным образом в виде оксидных неметаллических включений. Наличие их ухудшает свойства стали. Поэтому с целью снижения концентрации кислорода применяют процесс раскисления. Раскисление производится введением элементов-раскислителей, обладающих большим сродством к кислороду, чем железо (марганец, титан, цирконий, алюминий, кальций, редкоземельные металлы). Раскисление идет по реакциям:



где P – раскислитель.

На практике применяют следующие раскислители:

- марганец (ферромарганец) – слабый раскислитель;
- кремний (ферросилиций) – более сильный раскислитель;
- алюминий – активный раскислитель;

- комплексные раскислители (Si-Ca, Si-Mn, Si-Ca-Al и др.).

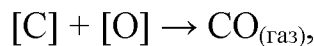
Способы раскисления сталей

Наиболее широко на практике применяют следующие способы раскисления:

1. Осаждающее (глубинное) раскисление. Раскислитель в кусковом виде вводится в расплав. Недостаток – продукты раскисления (неметаллические включения) не всегда успевают всплыть, и металл загрязняется ими. Этот способ самый простой и дешевый.

2. Диффузионное раскисление. Здесь раскислитель в порошкообразном виде наносится на поверхность шлака и раскисляет его. Концентрация кислорода в шлаке снижается, и кислород за счет диффузии уходит из металла.

3. Раскисление в вакууме идет по реакции:



$$K = \frac{P_{CO}}{[C][O]},$$

где K – константа равновесия;

P_{CO} – парциальное давление CO.

Отсюда концентрация кислорода $[O] = \frac{P_{CO}}{[C]}$. Уменьшение P_{CO} приводит

к удалению кислорода.

4. Раскисление обработкой сталей синтетическими шлаками в ковше.

Практика раскисления

В зависимости от степени раскисления различают стали кипящие, полуспокойные и спокойные.

Кипящая сталь – это слабо раскисленная 70%-м углеродистым ферромарганцем сталь. Из-за малой раскисленности сталь насыщена кислородом и при остывании кипит за счет выделения окиси углерода. Маркировка – КП.

Полуспокойная сталь – сначала раскисляется ферромарганцем и ферросилицием сначала в печи, а затем в ковше (раскислители – ферротитан, алюминий) или только в ковше. Маркировка – ПС.

Спокойная сталь – это сталь, раскисленная активными раскислителями, исключающими возможность кипения стали. Маркировка – СП.

Особенности выплавки стали в различных плавильных агрегатах

Конверторные процессы

Впервые этот процесс был предложен в 1855 г. англичанином Бессемером. Получил название бессемеровский процесс. Суть способа состоит в продувке жидкого чугуна воздухом в специальном агрегате, который называется конвертером. Конвертер представляет собой сосуд грушевидной формы, заключенный в металлический кожух и футерованный изнутри диоксидом (не менее 94 % SiO_2). Таким образом, это кислый процесс, и здесь окислителем является O_2 .

В 1878 г. Томас предложил продувать жидкий чугун в конверторах с основной футеровкой (доломит). Таким образом, томасовский процесс – это основной процесс. Он позволяет перерабатывать фосфористые чугуны.

Кислородно-конверторный процесс. Современный конверторный процесс является основным производителем стали в России, он сводится к выплавке стали в конвертерах с основной футеровкой с продувкой кислорода сверху через водоохлаждаемую фурму.

Мартеновский процесс

Мартеновская печь – это отражательная печь, снабженная регенераторами. Топливом служит жидкое (мазут) или широко применяемое газообразное топливо (природный газ). Таким образом, здесь топливом является CH_4 , а окислителем – воздух. Проходя через регенераторы, топливо и окислитель нагреваются и подаются в печь. На поду печи находится шихта, которая под действием пламени расплавляется. Таким образом, мартеновский процесс – это процесс на поду пламенной отражательной печи. Конструкция

печи была разработана немецкими инженерами Сименсами, а в 1864 г. француз Мартен впервые получил сталь в такой печи.

Во Франции и России процесс называется мартеновским, в Германии – сименсмартеновским, а в Англии и США – процесс на открытом поду.

В зависимости от материалов футеровки процессы бывают кислые и основные.

По составу шихты различают:

- скрап-процесс (шихта состоит из металлолома и чугуна);
- скрап-рудный процесс (шихта состоит из скрапа, чугуна, железной руды).

Электрометаллургия

Это выплавка сталей и сплавов в электропечах за счет джоулевого тепла (сопротивления). В электродуговых печах источником тепла являются электродуги, которые горят между угольным электродом и шихтой. В индукционных печах тепло создают вихревые токи.

1.5. Производство алюминия [2, 7, 9]

Температура плавления алюминия 660°C , плотность $2,7 \text{ г/см}^3$, тип кристаллической решетки – ГЦК.

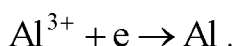
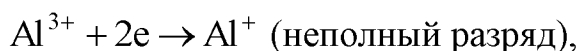
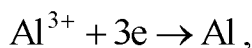
Основными видами исходного сырья для производства алюминия являются: бокситы, каолины, нефелины. Важнейшим из них являются бокситы.

В бокситах алюминий представлен в виде гидроокисей, глинозема Al_2O_3 и каолинов. Важнейшим промышленным способом получения алюминия является электролитический. Он основан на электролизе глинозема (Al_2O_3), растворенного в расплавленном криолите $3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$ [1, 2].

Глинозем и криолит в чистом виде в природе не встречаются, их получают искусственно.

Электролитическое производство алюминия

В состав электролитов могут входить 80 – 95 % криолита, до 8 – 10 % глинозема, а также добавки NaCl и CaF₂ для снижения температуры плавления электролита. Процесс ведут в специальных электролизерах. Анодом служит угольный электрод, а катодом – расплавленный алюминий, который накапливается в подине ванны. Катодный процесс сводится к разряду ионов алюминия по схемам:



Первая схема является определяющей.

Анодный процесс сводится к разряду ионов кислорода на угольном аноде с последующим окислением углерода анода и выделением CO и CO₂. При этом расходуется глинозем электролита и углерод анода.

Типовой режим электролиза:

- температура электролита 950 - 970°C;
- напряжение 4 – 4,5 В;
- сила тока 75 кА.

Накапливающийся при электролизе алюминий через трое-четверо суток извлекается из электролизера с помощью вакуумного ковша или сифона. Полученный электролизом алюминий содержит большое количество металлических, неметаллических и газообразных примесей. Такой алюминий для дальнейшей обработки непригоден и называется «алюминий-сырец». Поэтому алюминий рафинируют следующими способами:

- пропусканием газообразного хлора через расплав алюминия или обработкой этого расплава хлористыми солями,
- способом спокойного отстаивания.

В процессе этих способов рафинирования удаляются, главным образом, неметаллические и газообразные примеси, а также некоторые металлические примеси. На этом этапе получают первичный алюминий со степенью чистоты 99,5 – 99,85 %. Для дальнейшей очистки от примесей применяют

электролитическое рафинирование по 3-х слойному способу (чистота алюминия 99,997 %).

1.6. Производство магния [3, 8, 9]

Температура плавления магния 651°C, плотность 1,73 г/см³, тип кристаллической решетки – ГПУ.

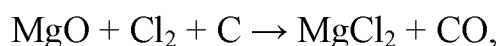
Основными видами промышленного сырья для производства магния являются: магнезит MgCO_3 , доломит $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$, карналлит $\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, бишофит $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (получают обезвоживанием карналлита или выпариванием соленых вод озер и морей).

Основной промышленный способ производства магния – электролитический. Он состоит из следующих стадий [2]:

I. Получение чистых безводных солей магния

Основу электролита составляет MgCl_2 . Его получают двумя способами:

а) хлорированием окиси магния по реакции:



б) обезвоживанием карналлита.

II. Электролиз

В состав электролита входят хлориды магния, кальция, натрия, калия. Процесс ведут в электролизерах диафрагменного типа с разделением анодного и катодного пространств специальной диафрагмой. Электролизер состоит из нескольких электрически соединенных ячеек. Каждая ячейка состоит из анода и двух стальных катодов. Анод изготавливается из графитированных плит. В катодном пространстве выделяется магний, который в жидком виде всплывает на поверхность электролита. В катодном пространстве выделяется магний, который в жидком виде всплывает на поверхность электролита. В катодном пространстве выделяется газообразный хлор. Полученный магний загрязнен примесями, поэтому его рафинируют.

III. Рафинирование магния ведут следующими способами:

а) плавка с флюсами (основа флюса MgCl_2). В состав входят также CaCl_2 , MgO , CaF_2 . Флюс тяжелее магния.

Жидкий магний из электролизера попадает в тигельную печь с электролитическим или пламенным обогревом. Флюс засыпается в печь с магнием и тщательно перемешивается. Происходит оседание флюса вместе с неметаллическими включениями.

б) возгонка основана на различии упругостей паров магния и примесей. Процесс ведут сублимацией магния в вакууме в ретортных печах. Нижняя часть реторты служит сублиматором, а верхняя часть охлаждается водой и служит конденсатором. Таким образом, магний испаряется, а затем конденсируется. Примеси остаются в нижней части реторты.

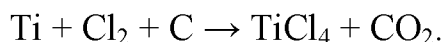
1.7. Производство титана [3, 8 – 10]

Температура плавления титана 1680°C , плотность $4,5 \text{ г/см}^3$. Титан испытывает полиморфное превращение при температуре 882°C . Ниже этой температуры тип кристаллической решетки ГПУ, выше – ОЦК.

В природе титан представлен TiO_2 окисью, различных титанатов и титано-силикатов. Важнейшей промышленной рудой является ильменит (FeTiO_3). Промышленным способом является мартеновский способ получения титановой губки. Этот способ включает в себя следующие стадии [2]:

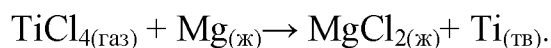
1. Производство титановых шлаков. В состав шихты входят ильменит и уголь. Шихта в виде брикетов плавится в трех-электродных дуговых печах. Получают два продукта: чугун и титановый шлак. В шлак переходит до 80 % TiO_2 .

2. Производство тетрахлорида титана TiCl_4 основано на реакции:



Шихта состоит из титанового шлака и кокса. Шихта в виде брикетов хлорируется в хлораторах непрерывного действия. Окончательный продукт процесса – это жидкий TiCl_4 . Его очищают от примесей и подают на восстановление.

3. Восстановление TiCl_4 магнием основано на реакции:



В стальной герметичный контейнер, нагретый до температуры 800°C , под небольшим избыточным давлением аргона заливается жидкий магний и подается TiCl_4 . Продукт процесса содержит 60 % титана, 30 % магния и 10% MgCl_2 .

4. Возгонка производится с целью разделения продуктов процесса, который идет в вакууме при температуре $950 - 1000^\circ\text{C}$.

После охлаждения титановая губка извлекается из контейнера с помощью пневматических зубил.

Разделение конденсата производится расплавлением.

2. ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ [5]

Порошковая металлургия – это отрасль техники, производящая заготовки и изделия из порошков металлов и их соединений. Классический вариант технологии порошковой металлургии состоит из следующих стадий: получения порошков, формования и упрочнения брикетов.

Преимущества технологии порошковой металлургии

1. Производство таких материалов и композиций, которые трудно или невозможно получить другими методами, а именно [3, 5]:

- получение тугоплавких металлов (вольфрам, молибден и др.);
- получение твердых сплавов типа ВК, ТК и др. на основе карбидов, композиций металлов и неметаллов;
- получение композиций «металл-неметалл»;
- получение композиций из металлов, несмешивающихся в расплавленном состоянии;
- получение пористых изделий.

2. Возможность получения чистых материалов: при плавке металл может загрязняться примесями из футеровки печей и тиглей. В порошковой технологии таких загрязнений нет.

3. Возможность получения материалов, свойства которых выше литых. Например, порошки, полученные распылением, представляют собой микрослитки с мелким строением и минимальной ликвацией. Изделия, изготовленные из этих порошков, обладают более высокими свойствами.

4. Значительная экономия материалов за счет получения изделий с готовыми или почти готовыми размерами.

5. Возможность переработки отходов и экологические аспекты технологии.

Основные недостатки

1. Изготовление изделий больших размеров и сложных форм затруднено или невозможно.

2. Трудность доведения порошковых материалов до компактного состояния.

3. При плавке вредные примеси могут переходить в шлак. В порошковой технологии такой возможности нет, следовательно, необходимо применять чистые по составу, но дорогие по цене порошки.

2.1. Способы получения порошков металлов и их соединений

Все способы делятся на физико-химические и механические способы. К основным методам получения порошков первой группы относят восстановление окислов, электролиз, термическая диссоциация карбониллов, СВС-процесс. К механическим методам принадлежат процессы дробления, измельчения и диспергирование.

Подробно указанные способы приведены автором [5].

2.2. Формование порошков

Применяют несколько методов формования. Цель формования – получение из порошка изделия заданных форм и размеров. Наиболее широко применяются следующие способы:

1. Прямое прессование

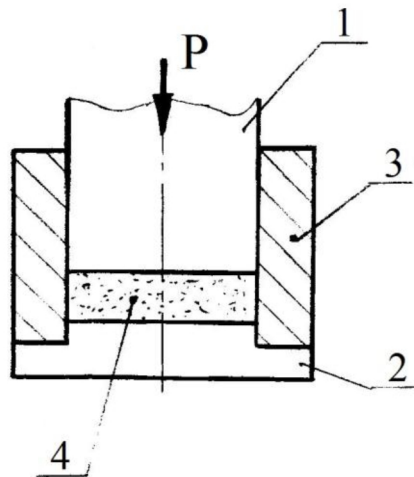


Рис. 4. Схема прессования: 1 – пуансон верхний, 2 – пуансон нижний, 3 – матрица, 4 – порошок

Схематически последовательность прессования представлена на рис. 5:

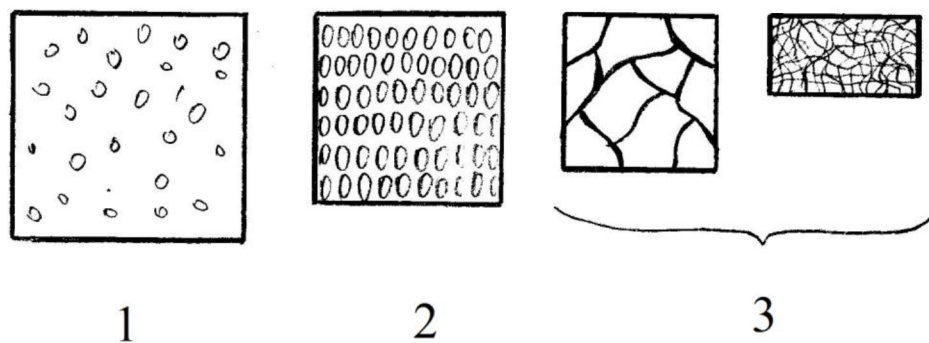


Рис. 5. Последовательность прессования: 1 – свободно засыпанный порошок, 2 – заполнение пустот частицами, 3 – деформация частиц порошка

Прессуемость порошка характеризуют зависимостью «плотность – давление прессования». Теоретически эта зависимость выглядит по стадиям I – III (рис. 6):

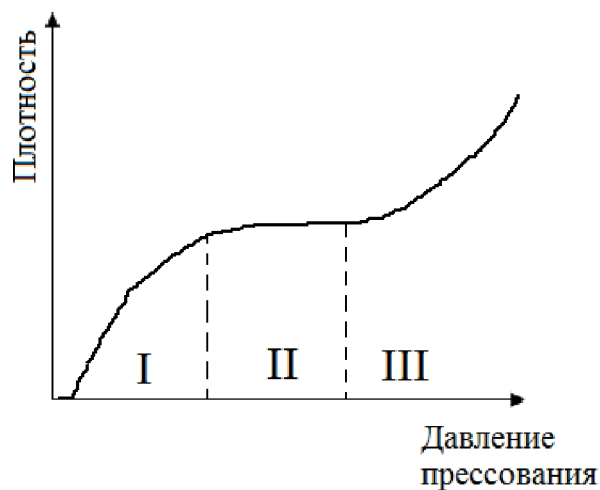


Рис. 6

где I – происходит интенсивное уплотнение за счет свободного перемещения частиц; II – плотноупакованные частицы на I-ой стадии оказывают сопротивление сжатию, давление растет, а порошок не уплотняется; III – пластическая деформация частиц порошка.

На практике все эти стадии накладываются и протекают почти одновременно (рис. 7).

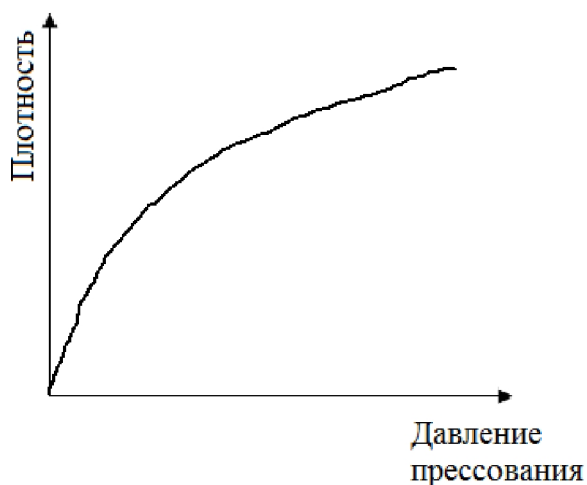


Рис. 7

2. Гидростатическое (изостатическое) прессование (рис. 8).

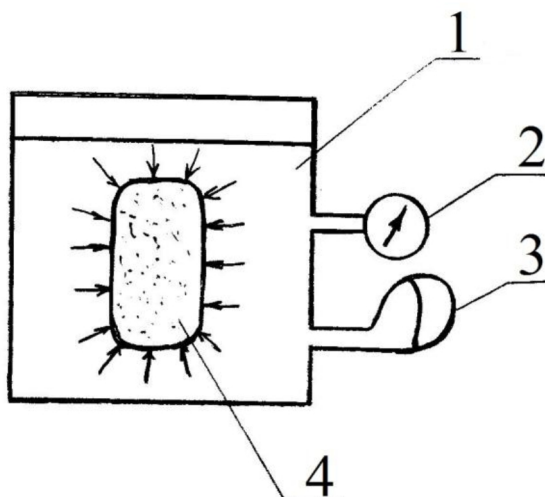


Рис. 8. Схема процесса: 1 – камера прессования, 2 – манометр, 3- насос высокого давления, 4 – эластичная оболочка с порошком.

В качестве эластичной оболочки чаще всего применяется резина. Жидкость (вода, масло, глицерин) создает всестороннее сжатие и формирует порошок.

3. Прокатка металлических порошков – это непрерывное формование изделий из порошка (листы, лента, проволока и др. изделия) Формование идет за счет пластической деформации частиц порошка между вращающимися валками. Применяют две схемы прокатки: вертикальную – (а) и горизонтальную – (б) (рис. 9).

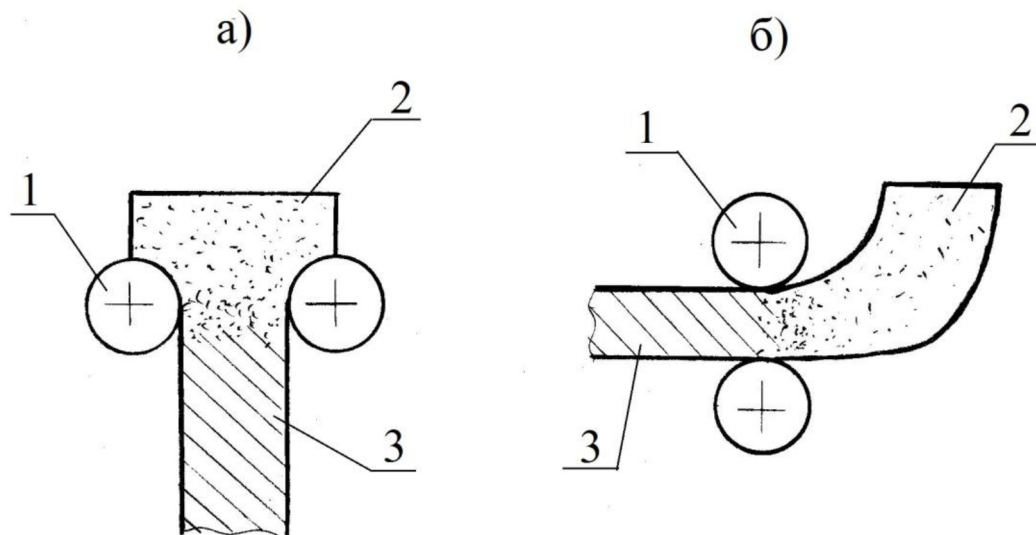


Рис. 9. 1 – вращающиеся валки, 2 – бункер с порошком, 3 – изделие

4. Другие способы формования: мундштучное, вибрационное и др.

2.3. Упрочнение пористых изделий

Главным способом упрочнения является спекание брикетов. Спекание – это нагрев и выдержка при заданной температуре в защитных средах. При спекании происходит «залечивание» пор, образований межчастичных контактов за счет процессов диффузии. Температура спекания примерно равна $(0,7 - 0,8)$ от $T_{пл.}$, где $T_{пл.}$ – температура плавления основного компонента шихты. В зависимости от состава шихты различают спекание в твердой фазе (твердофазная) или в жидкой фазе (жидкофазная). Защитные среды: восстановительные (водород), нейтральные (аргон), вакуум.

Для спекания применяют печи различных конструкций периодического и методического действий.

3. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ [9]

3.1. Общие теоретические сведения

ОМД основана на процессах пластической деформации металлов с целью получения заготовок и изделий заданных размеров и форм. Деформация исходит при нагружениях без разрушений металла.

Процессы ОМД характеризуются высокой производительностью, экономией металла, возможностью повышения механических свойств. Если для процессов механической обработки, например, резания коэффициент использования КИМ составляет около 0,15 – 0,16, то для способов ОМД этот показатель может достигать до 0,7 и более. Значение КИМ находят из соотношения $G_{\text{дет}}/G_{\text{заг.}}$, где G – соответственно вес детали и заготовки.

Основными технологическими процессами ОМД являются: прокатка, прессование, волочение, ковка, объёмная и листовая штамповка, отделочные (чеканка) и упрочняющие обработки.

Для разработки технологий ОМД необходимо знать, прежде всего, механические свойства металлов. На практике эти свойства определяют на стандартных плоских или круглых образцах путём их статического растяжения. При этом строится график в координатах «напряжение (σ) – степень пластической деформации (ϵ)».

Различают упругую и пластическую деформацию. Упругая деформация исчезает после снятия нагрузки, а пластическая остаётся. Прямолинейный участок диаграммы характеризует упругую деформацию. Из рис. 10 следует, что $\text{tg}\alpha = \sigma_A/\epsilon_A$. Таким образом, тангенс угла наклона характеризует упругость металла. Различают модули нормальной и касательной упругости. Модуль нормальной упругости (модуль Юнга) характеризует сопротивление отрыву, а модуль касательной упругости (модуль Гука) – сопротивление сдвигу. Модуль Юнга примерно в 2 – 3 раза превышает модуль Гука. Таким образом, модули упругости характеризуют жёсткость металла.

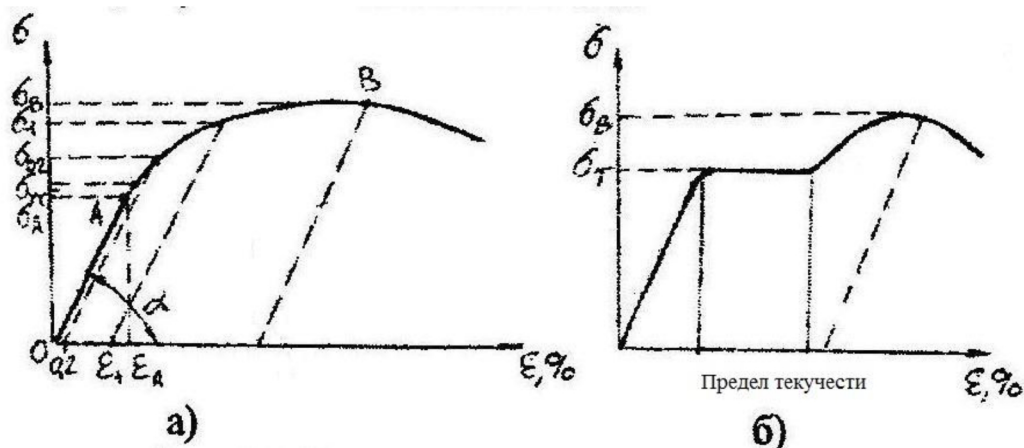


Рис. 10. Диаграмма растяжения металлов: а) площадка текучести отсутствует, б) наличие площадки текучести.

Выше точки А начинается пластическая деформация, которая характеризуется пределом текучести. Различают условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$) и физический предел текучести (σ_T). $\sigma_{0,2}$ – это напряжение, вызывающее остаточную деформацию 0,2 %. При наличии площадки текучести этот предел обозначают σ_T . σ_B – предел прочности (временное сопротивление разрушению). Площадь под кривой ОАВ характеризует энергию разрушения образца. Если эту величину отнести к площади сечения стандартного образца, то получим ударную вязкость. Стандартные образцы могут иметь круглый (KCU) или острый (KCV) надрезы.

Нагрузим образец до σ_1 . Это напряжение вызывает степень деформации ε_1 . Если затем снять нагрузку, то получим остаточную деформацию ε_1 . Если затем снова нагрузить, то пластическая деформация начнется не при $\varepsilon_{0,2}$, а при ε_1 . Таким образом, происходит упрочнение металла. Упрочнение металла при пластической деформации называется деформационным упрочнением или наклёпом.

Пластическая деформация осуществляется сдвигом (скольжением) и двойникованием:

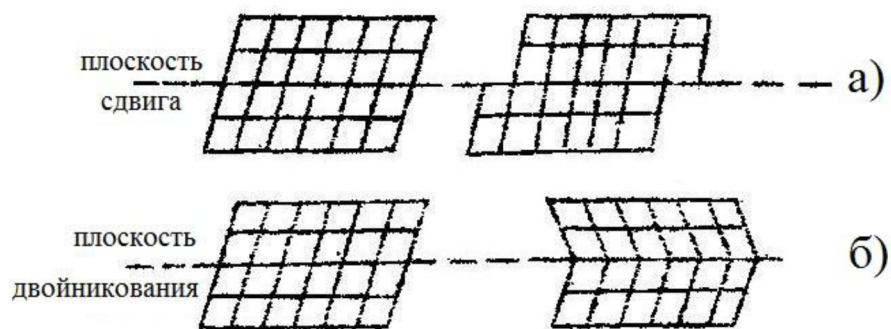


Рис. 11. Пластический сдвиг (а) и двойникование (б) в идеальной кристаллической решетке

Реальные металлы и сплавы имеют поликристаллическое строение, то есть состоят из множества кристаллов (зёрен). При этом они имеют различные дефекты (границы зёрен, неметаллические включения, несплошности в виде пор и раковин). В результате деформации несплошности раскатываются, вытягиваются и проявляются на изделиях в виде плёв, складок, надрывов, расслоений и трещин. Зёрна дробятся и вытягиваются в результате течения металла в определённых направлениях (рис. 12):

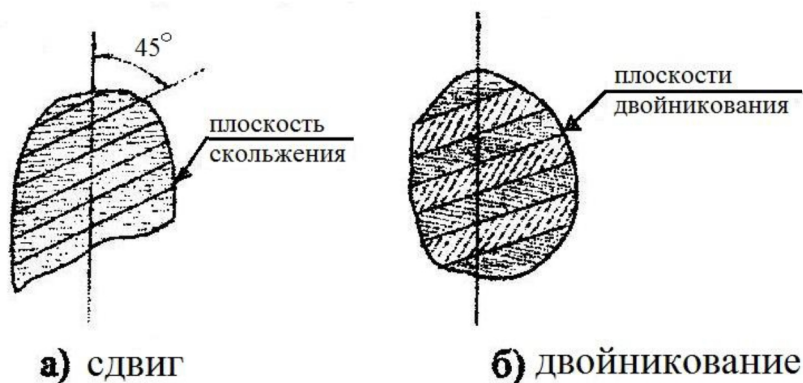


Рис. 12. а) сдвиг, б) двойникование

При дальнейшем повышении температур, начиная с некоторой температуры T_p , возникают структурные изменения, происходит рост новых зёрен взамен деформированных. Такой процесс называется рекристаллизацией. T_p – температура начала рекристаллизации. $T_p = \alpha \cdot T_{пл.}$, где α – коэффициент зависящий от природы и чистоты металла. Обычно для

металлов технические чистоты $\alpha = 0,3 - 0,4$. Если деформация происходит при $T < T_p$, то возникающий наклёп не устраняется, и такая обработка называется холодной обработкой давлением. Если деформация идёт при $T > T_p$, то возникающий наклёп устраняется, и такая обработка называется горячей обработкой давлением. Таким образом, границей между горячей и холодной обработками является T_p .

3.2 Прокатка [6]

Около 80 % выплавляемой стали поступает на прокатное производство. Прокатка – это процесс ОМД, основанный на пластической деформации металла между вращающимися валками заготовки. Он происходит за счёт сил трения между металлом и валками. Принципиальная схема прокатки показана на рис. 13.

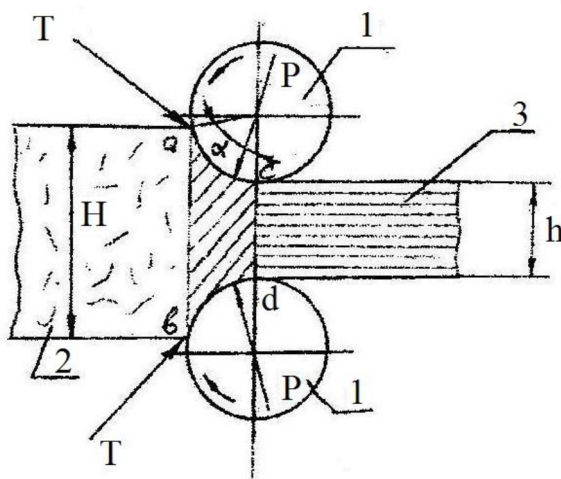


Рис. 13. Схема прокатки: 1 – вращающиеся валки, 2 – заготовка размером H (высота), 3 – изделие размером h , T – сила трения, P – нормальное давление, α – угол захвата, ac и bd – дуги захвата, $abcd$ – очаг деформации

Важнейшими параметрами деформации при прокатке являются: коэффициент вытяжки $\lambda = F/f$ и относительное обжатие $\varepsilon = (H - h)/H$, где F и f – соответственно площадь поперечного сечения заготовки и изделия.

При прокатке применяют гладкие валки для производства листов, полос, плит, фольги и валки с канавками (ручьями) для изготовления профилей (рис. 14).

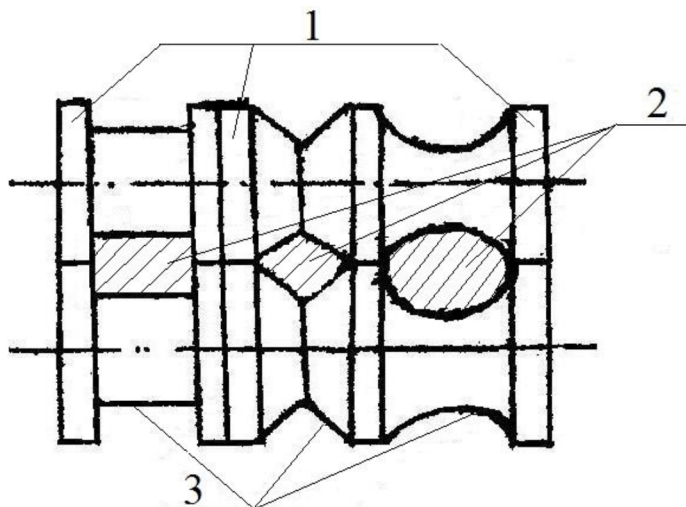


Рис. 14. 1 – валки калиброванные, 2 – изделия проката, 3 – ручьи (канавки) валки

Применяют следующие способы прокатки:

Продольная. Валки расположены параллельно и вращаются в разных направлениях, при этом они могут быть гладкими или иметь ручьи. Поперечная. Валки параллельны, но вращаются в одном направлении, что приводит к вращению заготовки. Применяется для производства зубчатых колес, звёздочек цепных передач и т.д. Схема прокатки приведена ниже на рис. 15.

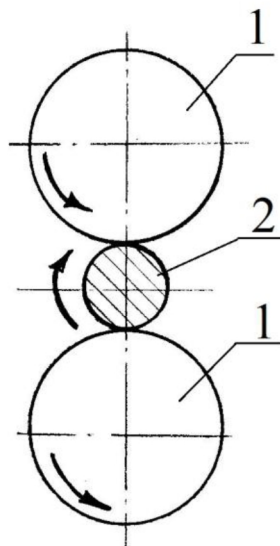


Рис. 15. 1 – валки, 2 – заготовки

Поперечно-винтовая (косая) прокатка. Валки вращаются в одном направлении, но расположены под углом друг к другу. При такой прокатке изделия не только вращаются, но и продвигаются вперёд. Применяются для производства бесшовных труб, осей, шаров и т.п. Схема прокатки бесшовных труб приведена на рис. 16.

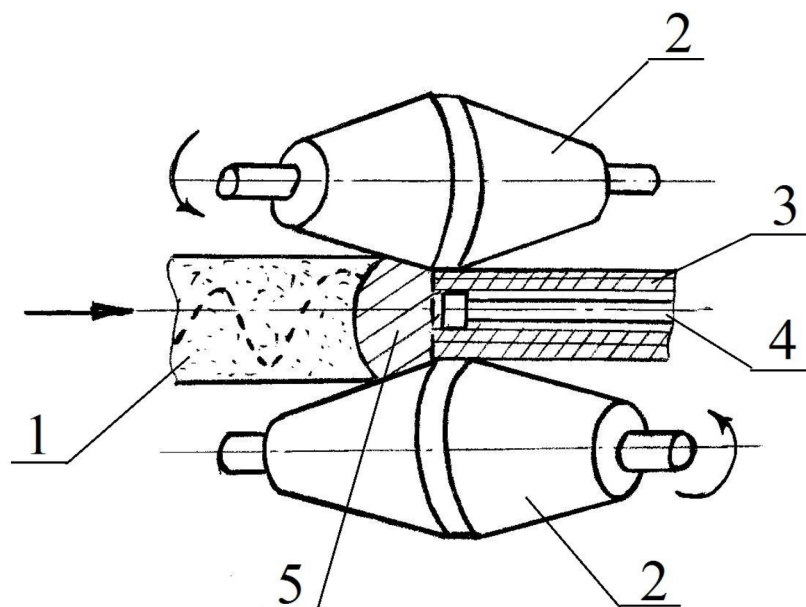


Рис. 16. Схема прокатки бесшовных труб: 1 – заготовка, 2 – валки, 3 – изделия (труба), 4 – штанга с оправкой, 5 – очаг деформации

Сортамент прокатного изделия

Это перечень изделий выпускаемого проката. Стальной прокат делится на группы: сортовой, листовой, трубный и специальный.

Сортовой прокат разделяется на простой и профильный. К простому относятся изделия следующих сечений: треугольное, квадратное, прямоугольное, шестигранное, круглое и овальное.

Фасонный прокат производит профили: уголки равнобокие, неравнобокие; тавры и двутавры; швеллеры; рельсы.

Листовой прокат

Делится на группы: толстолистовой (толщина 40 мм и более), тонколистовой (толщина 0,2 – 3,75 мм), широкополосный (ширина 200 – 1500 мм, толщина 4 – 60 мм).

Прокатные станы

Основной частью прокатных станов является рабочая клеть, в которой расположены валки. Станы классифицируются по следующим признакам:

- а) количеству валков (двухвалковые, трёхвалковые, многовалковые);
- б) количеству клетей и их расположению;
- в) характеру выпускаемой продукции (листовые, сортовые, рельсобалочные, проволочные, трубные и др.).

3.3 Волочение [6]

Процесс сводится к протягиванию заготовки через сужающий канал инструмента (волока, фильера, матрица). Схема получения изделий сплошного сечения показана на рис. 17.

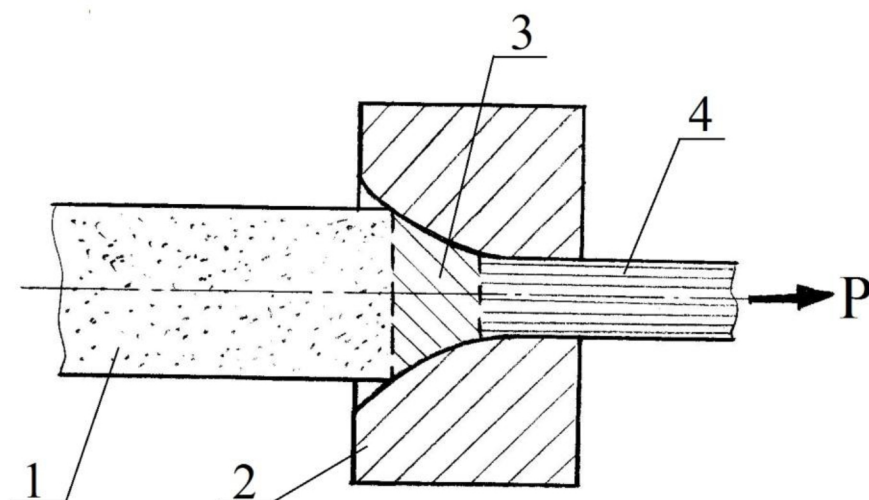


Рис. 17. Схема волочения: 1 – заготовка, 2 – волока, 3 – очаг деформации, 4 – изделие, P – направление приложения нагрузки

Волочением получают проволоку диаметрами от 2 мкм до 6 мм, калиброванные прутки различных поперечных сечений: круг, квадрат, прямоугольник, многогранник. Для производства полых изделий (трубы, полые профили различных поперечных сечений) применяют волочение на неподвижной или самоустанавливающейся оправках (рис. 18).

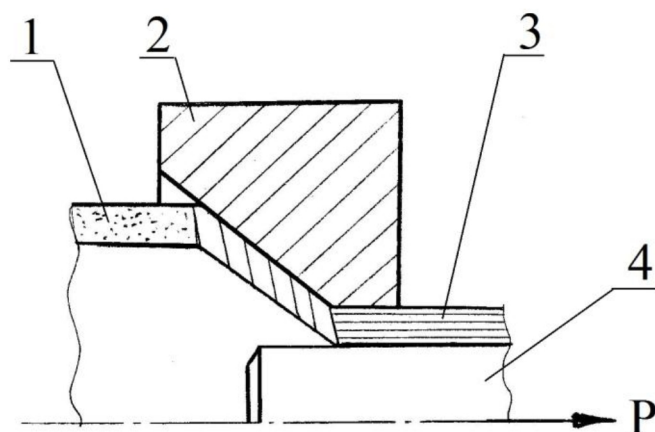


Рис. 18. Схема волочения полых изделий: 1 – заготовка, 2 – волока, 3 – изделие, 4 – оправка, P – направление приложения нагрузки

3.4 Прессование [6]

Это способ ОМД, заключающийся в выдавливании металла из замкнутой полости через отверстие заданного сечения. Различают холодное и горячее прессование в вертикальном и горизонтальном направлениях. Применяют два метода прессования: прямой (а) и обратный (б) (рис. 19).

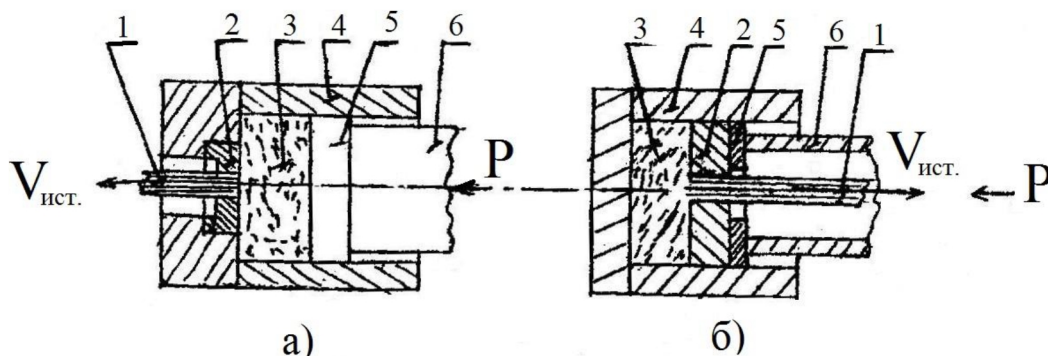


Рис. 19. Схемы прямого и обратного методов прессования: 1 – изделия, 2 – матрица, 3 – слиток, 4 – контейнер, 5 – прессшайба, 6 – прессштемпель, $V_{ист.}$ – направление скорости истечения металла, P – направление приложения нагрузки

Ниже приведена схема прессования труб (рис. 20).

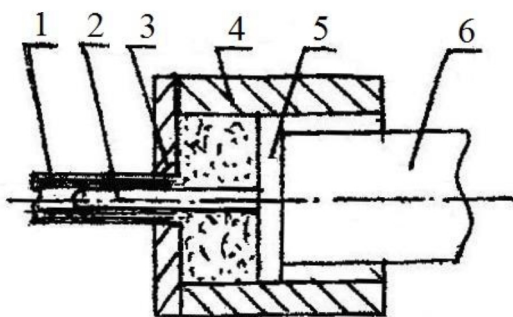


Рис. 20. Схема прессования труб: 1 – изделие (труба), 2 – игла, 3 – матрица, 4 – контейнер, 5 – прессшайба, 6 – прессштемпель

Сортамент прессованных профилей из алюминиевых сплавов

Сортамент прессованных профилей из алюминиевых сплавов включает около 20 тыс. наименований. Наиболее часто выпускаются три вида профилей:

1. Сплошного сечения постоянного по длине профиля;
2. Сплошного сечения переменного по длине профиля;
3. Полого сечения постоянного по длине профиля.

Основные типы профилей сплошного сечения постоянного по длине профиля:

- полосы;
- уголки;
- тавры;
- двутавры;
- швеллеры;
- зетовые;
- произвольной формы.

Профиля сплошного сечения переменного по длине профиля могут иметь а) ступенчатое или б) плавное изменение сечения. Из первой группы – тавровые, двутавровые, швеллерные, швеллерные с отбортовкой, зетовые и произвольного сечения. Из второй группы – уголки и швеллера.

Профили полого сечения с одним круглым отверстием; с одним прямоугольным или квадратным сечением; с одним отверстием произвольной формы и с двумя или более отверстиями произвольной формы.

3.5 Кузнечно-штамповочное производство [б]

Включает несколько основных процессов.

Ковка

Состоит в горячей деформации с помощью специального инструмента. К основным операциям ковки относят осадку, протяжку, прошивку, обрубку, гибку.

Ниже приведены некоторые схемы указанных операций.

Осадка

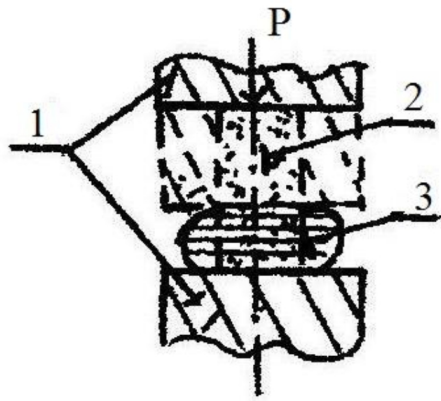


Рис. 21. Схема процесса осадки: 1 – верхний и нижний бойки, 2 – заготовка, 3 – изделие (диск)

Прошивка

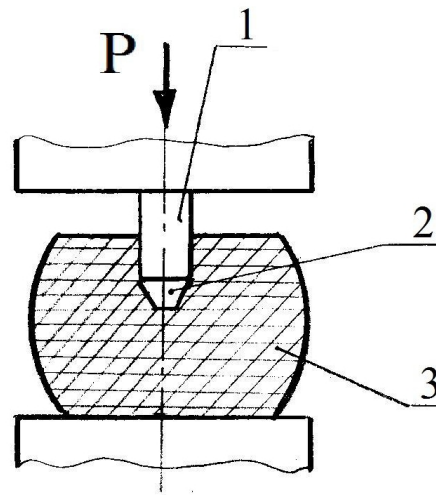


Рис. 22. Схема процесса прошивки: 1 – надставка, 2 – прошивень, 3 – заготовка (после прошивки – изделие)

Протяжка

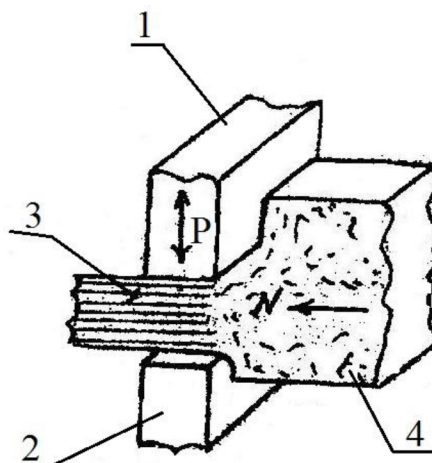


Рис. 23. Схема процесса протяжки: 1, 2 – бойки, 3 – изделие, 4 – заготовка, P – направление приложения нагрузки, N – направление движения заготовки и изделия

Горячая объёмная штамповка

Производится в штампах открытого (с облоем) и закрытого (безоблойная) типов. На рис. 24 приведена схема штамповки в открытых штампах.

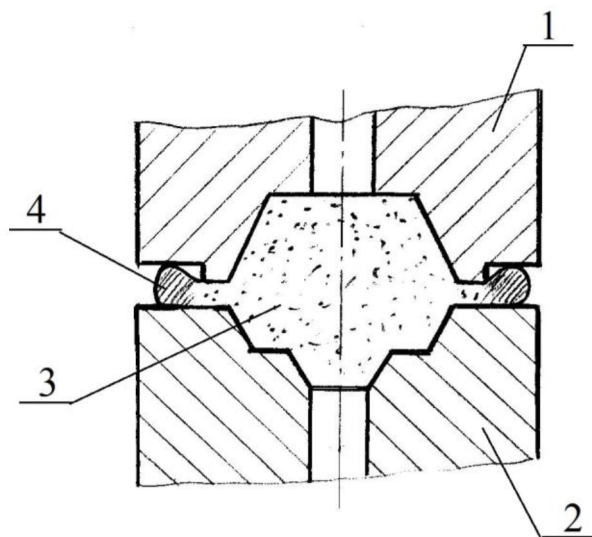


Рис. 24. Схема штамповки в открытых штампах: 1, 2 – верхняя и нижняя части штампа, 3 – заготовка (изделие), 4 – облой

Холодная листовая штамповка

Разделяется на тонколистовую (толщина листа до 4-х мм) и толстолистовую (более 4-х мм). Все операции листовой штамповки делят на разъединительные (отрезка, вырубка, пробивка) и формообразующие (гибка, вытяжка, формовка). Ниже приведены схемы операций вытяжки и формовки.

Вытяжка

Процесс операции, когда плоская заготовка приобретает форму сосуда.

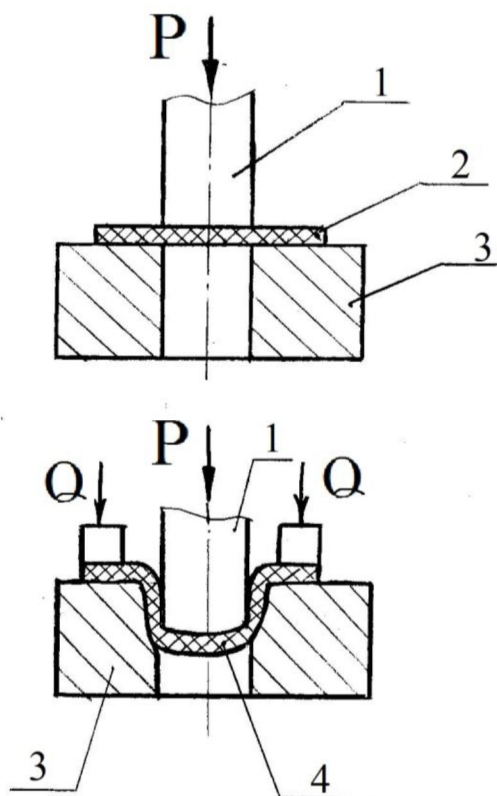


Рис. 25. Схема процесса вытяжки: 1 – пуансон, 2 – заготовка, 3 – матрица, 4 – изделие, Q – направление усилия прижима заготовки, Р – направление приложения нагрузки

Формовка

Операция получения местных углублений и выпуклостей.

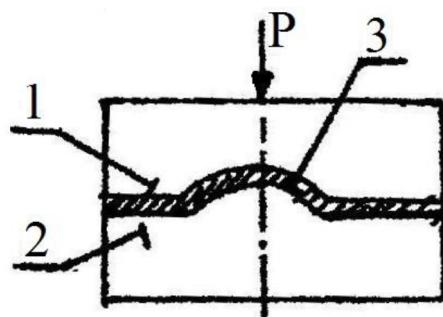


Рис. 26. Схема операции формовки: 1, 2 – верхняя и нижняя части штампа, 3 – изделие, P – направление приложения нагрузки

4. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА СПЛАВОВ И СТАЛЕЙ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ [2]

Для производства сплавов и сталей ответственного назначения требуются металлы высокой чистоты. Если раньше сплавы в основном выплавляли только в открытых печах, то в настоящее время ряд сплавов получают в вакууме или инертной среде. При этом расплавы перед заливкой необходимо фильтровать с целью их рафинирования.

Для повышения ресурса и надежности техники необходимо совершенствование технологии производства специальных сталей и сплавов с разработкой новых прогрессивных методов выплавки, направленных на повышение эффективности производства и улучшение качества продукции. В настоящее время получили дальнейшее развитие вакуумная индукционная плавка (ВИП), вакуумный дуговой (ВДП), электро-шлаковый (ЭШП), электронно-лучевой (ЭЛП) и плазменно-дуговой (ПДП) переплавы, а также вытяжка из расплава, ВДП полых слитков, прессование слитков из гранул, получение хлопьевидных чешуйчатых металлов и др.

4.1. Процессы при плавке в вакууме

Законы термодинамики можно применять только для определения состояния равновесия системы. Они позволяют установить возможность протекания реакций и их конечное состояние.

Правило фаз определяет число фаз, которые могут существовать в равновесии. Оно выражается уравнением $\Phi = K - C + 2$, где Φ – число фаз, K – число компонентов, C – число степеней свободы.

Число компонентов в большинстве металлургических систем равно числу химических элементов.

Степени свободы – это переменные, которые можно изменять, не изменяя числа фаз. Этими переменными являются давление, температура и

состав фаз. Таким образом, одной из важнейших переменных является давление, которое определяет число и состав фаз.

Принцип Ле-Шателье сводится к тому, что изменение одной из переменных (температуры или давления), при которых система находится в равновесии, приводит к тому, что система стремится аннулировать это изменение.

Применительно к вакуумной металлургии важность принципа состоит в том, что понижение давления приводит к протеканию тех реакций, которые вызывают увеличение числа молекул, находящихся в газообразном состоянии.

Изменение свободной энергии и константа равновесия. Вычислить значение свободной энергии F или изменение ее ΔF невозможно. Значение F определяют по отношению к стандартному состоянию. Стандартное состояние – 0 это состояние чистого твердого, жидкого или газообразного вещества при давлении 1 атм.

При этом определяют разность $F - F^0$, т.е. $F - F^0 = RT \cdot \ln a$, где F^0 – стандартная свободная энергия, a – активность (для стандартного состояния $a = 1$).

Для примера рассмотрим реакцию: $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{CO} \xrightleftharpoons{\leftarrow} 3\text{Fe} + 4\text{CO}_2$.

Изменение свободной энергии этой реакции

$$\Delta F = 3F_{\text{Fe}} + 4F_{\text{CO}_2} - (F_{\text{Fe}_3\text{O}_4} + 4F_{\text{CO}}).$$

Если реагенты находятся в стандартном состоянии, то

$$\Delta F^0 = 3F_{\text{Fe}}^0 + 4F_{\text{CO}_2}^0 - (F_{\text{Fe}_3\text{O}_4}^0 + 4F_{\text{CO}}^0).$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta F - \Delta F^0 &= 3(F_{\text{Fe}} - F_{\text{Fe}}^0) + 4(F_{\text{CO}_2} - F_{\text{CO}_2}^0) - (F_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - F_{\text{Fe}_3\text{O}_4}^0) - \\ &- 4(F_{\text{CO}} - F_{\text{CO}}^0) = 3R \cdot T \cdot \ln a_{\text{Fe}} + 4R \cdot T \cdot \ln a_{\text{CO}_2} - R \cdot T \cdot \ln a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} - \\ &- 4R \cdot T \cdot \ln a_{\text{CO}} = \frac{(R \cdot T \cdot \ln a_{\text{Fe}}^3 \cdot a_{\text{CO}}^4)}{a_{\text{Fe}_3\text{O}_4} \cdot a_{\text{CO}}^4}. \end{aligned}$$

Если реакция находится в равновесии, то $\Delta F = 0$, и отношение активностей называют в этом случае константой равновесия K :

$$\Delta F^0 = -R \cdot T \cdot \ln K.$$

Значения ΔF^0 известны для реакций образования окислов, сульфидов и карбидов, т.е. для простых реакций. В литературе ΔF^0 представлены в виде графиков, таблиц и полуэмпирических уравнений.

Аддитивность изменения свободной энергии позволяет производить расчеты для сложных реакций. Так, для реакции



не приводится значение ΔF^0 , но его можно рассчитать следующим образом:



Тогда для реакции (1)

$$\Delta F_{(1)}^0 = 4\Delta F_{(4)} - 4\Delta F_{(3)} - \Delta F_{(2)}$$

и

$$K_{(1)} = \frac{K_{(4)}^4}{K_{(3)}^4 K_{(2)}}.$$

Значения $\Delta F_{(2)}$, $\Delta F_{(3)}$, $\Delta F_{(4)}$ приводятся в графиках и таблицах литературы [9].

Активность является величиной относительной и поэтому она не поддается измерению. Но активность является функцией концентрации. Для чистых твердых и жидких веществ активность равна 1. В твердых и жидких растворах активность выражается в молярных долях N . Так, для двойного раствора А и В молярная доля А определяется из отношения

$$N_A = \frac{\frac{\% \text{вес } A}{M_A}}{\frac{\% \text{вес } A}{M_A} + \frac{\% \text{вес } B}{M_B}},$$

где M – молекулярный вес.

Активность может быть представлена в виде

$$A = \frac{P_A}{P_A^0},$$

где P_A – парциальное давление пара вещества A над раствором;

P_A^0 – давление пара чистого вещества.

Если $a_A = N_A$, такой раствор называется идеальным и он подвергается закону Рауля, т.е. $P_A = N_A \cdot P_A^0$.

Для разбавления растворов $N_A \rightarrow 0$ и a_A становится все более пропорциональной N_A . Такой раствор отвечает закону Генри.

Для реальных растворов $a_A = f_A \cdot N_A$, где f_A – коэффициент активности, который может быть больше или меньше 1. На рис. 27 приведено соотношение между активностями по Раулю и Генри.

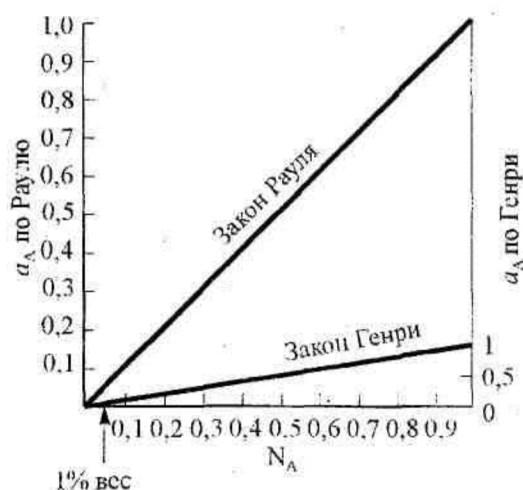
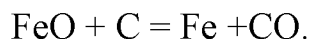


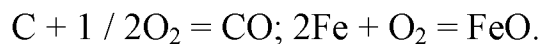
Рис. 27. Соотношение между активностями по Раулю и Генри

Рассмотрим реакции, представляющие наибольший интерес в металлургии.

Реакции газов с твердыми веществами. Рассмотрим реакцию:



Изменение стандартной свободной энергии этой реакции можно вычислить из значений изменения стандартных свободных энергий CO и FeO:



Найдем значения ΔF^0 при температуре 1200°C из таблиц или графиков, приводимых в литературе [9]:

$$\Delta F_{\text{CO}}^0 (1200^\circ\text{C}) = -50150 \text{ кал } (210,13 \cdot 10^3 \text{ Дж});$$

$$\Delta F_{\text{FeO}}^0 (1200^\circ\text{C}) = -80000 \text{ кал } (210,13 \cdot 10^3 \text{ Дж}).$$

Тогда изменение стандартной свободной энергии реакции при 1200°C составит

$$\Delta F^0 = \Delta F_{\text{CO}} - \Delta F_{\text{FeO}} = -50150 + 80000 = 29850 \text{ кал}$$

Из $\Delta F^0 = -R \cdot T \cdot \ln K$ найдем

$$\ln K = \frac{-29850}{4,575 \cdot 1200} = -5,45,$$

$$K = \frac{P_{\text{CO}} \cdot \alpha_{\text{Fe}}}{\alpha_{\text{FeO}} \cdot \alpha_{\text{C}}} = 3,6 \cdot 10^{-6}.$$

Так как активности F_{C} , F_{CO} и C при стандартном состоянии равны 1, то $P_{\text{CO}} = 3,5 \cdot 10^{-6}$ атм.

Таким образом, в вакуумной печи необходимо поддерживать $P = 760 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. $= 3,99 \cdot 10^{-1}$ Па.

Испарение. При выплавке в вакууме из сплавов испаряются компоненты с высокой упругостью паров. На рис. 28 показана зависимость упругости паров металла от температуры. Для получения парциального давления какого-либо компонента сплава над расплавом необходимо величину P^0 , приведенную на этом рисунке, умножить на активность $P_a = \alpha P_A^0$. Если активность α неизвестна, можно применять приближенно закон Рауля, т.е. активность приравнять к молярной доле $P_A = N_A P_A^0$.

При вакуумной плавке интерес представляют элементы, расположенные левее железа (см. рис. 28), особенно Mn и Cz, так как они могут испаряться в процессе плавки.

Максимальная скорость испарения определяется из соотношения

$$W = P_A \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}},$$

где W – максимальная скорость испарения, г/см²/с;

P_A – давление пара, дин/см²;

M – молекулярный вес, г;

R – газовая постоянная, $8,3 \cdot 10^7$ эрг/моль/град;

T – температура, К.

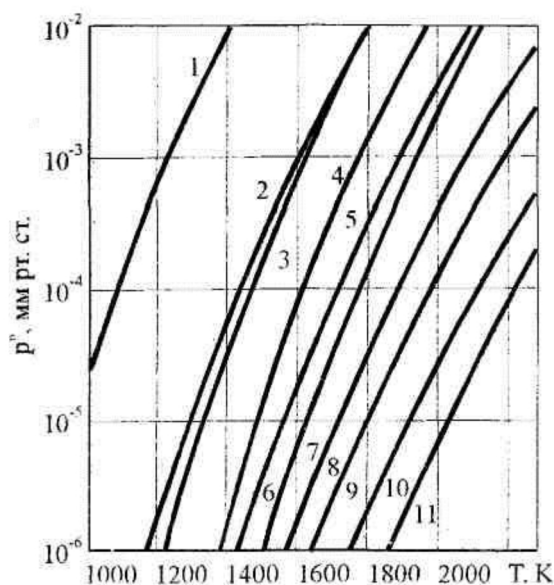


Рис.28. Изменение давления пара металлов в зависимости от температуры: 1 – Pb; 2 – Mn; 3 – Ag; 4 – Cr; 5 – Sn; 6 – Cu; 7 – Si; 8 – Fe; 9 – Ni; 10 – CO; 11 – Ti

Для определения скорости испарения компонентов сплава при вакуумной плавке необходимо в соотношение подставить не упругость пара, а парциальное давление $P_a = \alpha P_A^0$.

Десульфация. При вакуумной плавке сера может удаляться в виде соединений с водородом и кислородом. Так, для железа и его сплавов возможны следующие реакции:

$$[S] = \frac{1}{2} S_{2 \text{ газ}}, K = \frac{P_{S_2}^{1/2}}{a_S} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ (при } 1600^\circ\text{C)};$$

$$[S] + 2[O] = SO_{2 \text{ газ}}, K = \frac{P_{SO_2}}{a_S a_O^2} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ (при } 1600^\circ\text{C)};$$

$$H_{2 \text{ газ}} [S] = H_2 S_{\text{газ}}, K = \frac{P_{H_2 S}}{P_{H_2} a_S} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ (при } 1600^\circ\text{C)}.$$

Для проведения активной десульфурации можно применять металлические десульфураторы, например кальций и церий:

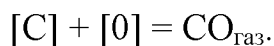
$$CeS = [Ce] + [S]; K = [\%Ce] \cdot [\%S] = (2,6 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ (при } 1600^\circ\text{C)}.$$

Если в ванну ввести 0,3 % церия, то она будет находиться в равновесии при 0,005 % серы. Главным недостатком металлических десульфураторов является загрязнение металла сульфидами.

Раскисление. При вакуумной плавке снижение концентрации кислорода в металле может быть достигнуто следующими путями.

1. *Взаимодействие с углеродом.* Сплавы, содержащие углерод, могут быть хорошо раскислены в вакууме.

Допустим, сталь содержит 0,2 % О и остаточное давление составляет 10^{-5} атм. Раскисление углеродом идет по реакции



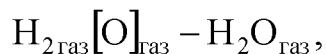
Константа равновесия этой реакции

$$K = \frac{P_{\text{газ}}}{[\%O] \cdot [\%C]}.$$

При 1600° $K = 420$. Тогда

$$[\%O] = \frac{P_{\text{газ}}}{K [\%C]} = \frac{10^{-5}}{420 \cdot 0,2} = 1,2 \cdot 10^{-7}.$$

2. Восстановление водородом. Раскисление водородом идет по реакции



$$K = \frac{P_{H_2O}}{P_{N_2}} \frac{1}{[\%O]}.$$

Так как содержание остаточного кислорода в металле зависит от отношения $\frac{H_2O}{H_2}$, вакуум не оказывает влияния на раскисление. Но пониженное давление необходимо для удаления остаточного водорода после раскисления и для предотвращения вторичного окисления металла до конца плавки. Раскисление водородом имеет преимущества, так как не требует внесения в ванну углерода и других раскислителей.

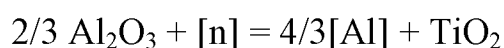
3. *Раскисление элементами с большим сродством к кислороду.* Лучше всего использовать для этой цели элементы, являющиеся легирующими компонентами данного сплава, например титан или цирконий для большинства жаропрочных сплавов.

Взаимодействие металла с огнеупорами. Наличие низких давлений значительно облегчает взаимодействие окислов огнеупоров с активными элементами расплава.

Чистые окислы, которые могут входить в состав огнеупорных материалов, по величине стандартной свободной энергии их образования на 1 моль O_2 можно расположить в ряд: SiO_2 , $2MgO$, $2/3Al_2O_3$, ZrO_2 , $2BeO$, $2CaO$, ThO_2 .

В верхних рядах расположены легко восстановимые окислы.

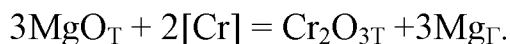
При вакуумной плавке могут быть восстановлены окислы огнеупора такими элементами, как Ti и Al. Окислы, находящиеся в растворе, могут также восстанавливаться углеродом с образованием CO. Окись магния MgO восстанавливается с образованием газообразного Mg. Так, реакция



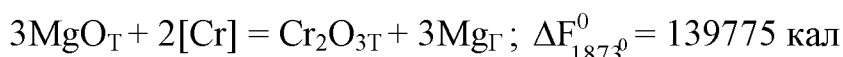
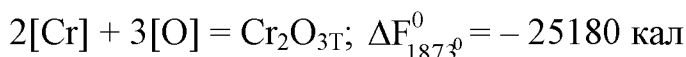
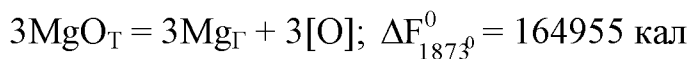
может протекать и в вакууме, и при атмосферном давлении. Но при высокой температуре Al имеет заметную упругость пара (при 1600°C она составляет 4,6 мм рт. ст.).

Наиболее широко выплавляют в вакууме сплавы, содержащие хром. Поэтому рассмотрим взаимодействие хрома, растворенного в металле, с глиноземом и окисью магния.

В случае магнезитовой футеровки может идти реакция



Для расчета рассмотрим реакции:



Константа равновесия данной реакции равна

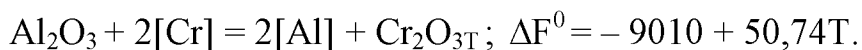
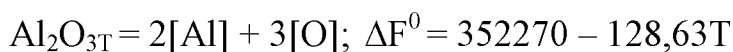
$$K = \frac{P_{\text{Mg}}^3}{[\%C]}; \ln K_{1873^\circ} = \frac{\Delta F_{1873^\circ}^0}{RT} = -\frac{139775}{1,576 \cdot 1873^0}.$$

Таким образом, $K = 5 \cdot 10^{-17}$ и $P_{\text{Mg}} = \sqrt[3]{[\%Cr] \cdot 5 \cdot 10^{-17}}$.

Так при 18% Cr в стали получаем $P_{\text{Mg}} = 0,02$ мм рт. ст.

Полученное значение упругости пара магния говорит о том, что металл может загрязняться окислами хрома, а содержание кислорода будет возрастать.

Можно провести аналогичные расчеты для глинозема:



При 1873 К $\Delta F_{1873^\circ}^0 = 85990$ кал.

Тогда

$$K = \frac{\Delta F_{1873}^0}{R \cdot T} = -\frac{85990}{4,576 \cdot 1873^0};$$

$$K_{1873} = 9,35 \cdot 10^{-11}.$$

Константа равновесия реакции

$$K = \frac{a_{Al}^2}{a_{Cr}^2}.$$

Дальнейшие расчеты показывают, что при выплавке в вакууме стали с 18 % Сг в металле может появиться 0,000174 % Al.

Процессы дегазации. Удаление газов из металла является одной из задач вакуумной плавки. Только в вакууме можно обеспечить содержание водорода 0,0001 – 0,0002 %, кислорода 0,0002 – 0,001 %, азота 0,005 – 0,1 %.

Удаление кислорода в вакууме может происходить из жидкого металла за счет всплывания окислов, удаления пузырьков СО (при взаимодействии углерода, растворенного в металле, с кислородом) и испарения летучих субокислов. Субокислы представляют собой наименее окислы элементов, обладающие высокой упругостью пара.

Удаление азота и водорода из жидкого металла при выплавке в вакууме может происходить в следующих случаях:

- 1 – выделение пузырьков азота и водорода (при их высоком содержании в металле);
- 2 – всплытие нитридных и гидридных фаз в случае их образования;
- 3 – десорбция газа с поверхности ванны.

Основной причиной удаления газов из металла в вакууме является подчинение растворов азота и водорода в жидком металле закону Генри.

Частичным случаем этого закона является закон Сиверста, согласно которому

$$[\%N] = K_N \sqrt{P_{N_2}}; [\%H] = K_H \sqrt{P_{H_2}},$$

где K_N и K_H – растворимость азота водорода в сплаве при данной температуре и парциальном давлении P_{N_2} , P_{H_2} , равном 1 атм.

2. Обработка расплавов

С целью повышения качества металла разработаны специальные методы. Все они основаны на применении следующих приемов: обработка металла

вакуумом и специальными шлаками, продувка расплава инертными газами и порошкообразными материалами. Для этого разработаны и широко применяются переплавные процессы и внепечная обработка металла.

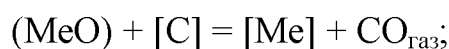
Обработка металлов вакуумом. Вакуум влияет на протекание реакций и процессов, в которых принимает участие газовая фаза. В стали практически всегда содержится углерод. В вакууме резко возрастает раскислительная способность углерода, так как реакция $[C] + [O] = CO_{\text{газ}}$ сдвигается вправо.

Константа равновесия этой реакции:

$$K_p = \frac{P_{CO}}{a_C a_O}; \quad a_O = \frac{P_{CO}}{a_C K_p},$$

т.е. уменьшение P_{CO} приводит к снижению количества кислорода в металле.

Если кислород находится в виде оксидных неметаллических включений, то снижение давления приводит к частичному или полному разрушению этих включений:



$$K_p = \frac{P_{CO} \cdot a_{Me}}{a_{MeO} \cdot a_C}; \quad a_{MeO} = \frac{P_{CO} \cdot a_{Me}}{K_p \cdot a_C}.$$

При обработке вакуумом удаляются также водород и азот. Известно, что

$$[H] = K \sqrt{P_{H_2}}.$$

В вакууме реакция $2[H] \xrightleftharpoons{\leftarrow} H_{2 \text{ газ}}$ сдвигается вправо и поэтому водород удаляется из металла. Важно учесть, что водород обладает большой подвижностью (большой коэффициент диффузии водорода в жидком железе $D_H = (1,2 - 1,5) \cdot 10^{-3} \text{ см/с}$).

Равновесие реакции $2[N] \xrightleftharpoons{\leftarrow} N_{2 \text{ газ}}$ сдвигается в вакууме вправо, и азот удаляется из металла. Но подвижность азота меньше, чем у водорода ($D_N = (1 - 4) \cdot 10^{-4} \text{ см/с}$), поэтому требуются более глубокий вакуум и большая выдержка в вакууме.

Кроме того, в выделившихся пузырьках CO, как в вакууме (в иных парциальные давления азота и водорода равны нулю, т.е. $P_{N_2} = 0$ и $P_{H_2} = 0$), растворяются азот и водород и удаляются вместе с CO. При этом выделяющиеся пузырьки газов перемешивают расплав и гомогенизируют его.

В вакууме испаряются также примеси легкоплавких цветных металлов (Pb, Sb, Zn, Sn и др.), которые резко ухудшают свойства сплавов, особенно жаропрочных.

Надо иметь в виду, что из-за высокой раскислительной способности в вакууме углерод взаимодействует с материалом тигля и восстанавливает окислы тигля, которые переходят в металл. Поэтому при вакуумной плавке очень важен вопрос выбора материала тигля.

Продувка металла инертными газами. При продувке жидкий металл пронизывают пузырьки инертного газа (чаще всего аргона). В этих пузырьках парциальные давления водорода и аргона равны нулю, поэтому, как в вакууме, в пузырьках инертного газа растворяются азот и водород и удаляются из металла.

Продувка газом перемешивает сплав и усредняет его химический состав. Важно также, что при этом облегчается удаление неметаллических включений в шлак. Необходимо иметь в виду, что продувка жидкого металла газом снижает температуру расплава.

При производстве простых марок сталей аргон заменяют более дешевыми газами (азот, пар).

Продувка металла порошкообразными материалами. Порошкообразный материал вводится в расплав газом-носителем. Газом-носителем может быть окислитель (кислород, воздух), восстановитель (природный газ) и нейтральный газ (аргон).

Для удаления фосфора в металл вдувают в струе кислорода смесь, состоящую из извести, железной руды и плавикового шпата. Для удаления серы в струе аргона вдувают смесь извести и плавикового шпата. Этим способом вводят в металл легирующие добавки, которые нельзя вводить

обычным способом из-за пироэффекта (Ca, Mg) или вредного действия на здоровье рабочего (Pb, Se, Te).

4.3. Переплавные процессы ("спецметаллургия")

Спецпереплаву подвергают слитки и заготовки, полученные обычными способами (конвертер, мартен, электропечь). К переплавным процессам относят вакуумный индукционный (ВИП), вакуумный дуговой (ВДП), электрошлаковый (ЭШП), электронный лучевой (ЭЛП) и плазменный дуговой (ПДП) переплавы.

Вакуумный индукционный переплав (ВИП). По емкости существующие вакуумные индукционные печи условно разделяют на три группы:

- 1 – лабораторные печи с тиглем емкостью до 20 – 25 кг;
- 2 – полупромышленные печи емкостью 25 – 100 кг для выплавки небольших партий опытного металла и для получения отливок в вакууме;
- 3 – промышленные печи малой (0,15 – 1,0 т), средней (2 – 7 т) и большой (12 – 54 т) емкости.

По принципу действия вакуумные индукционные печи делятся на периодические и полунепрерывные.

В печах периодического действия операции по загрузке шихты в тигель, установке пустых и извлечению залитых форм и изложниц, зачистке и подготовке тигля к плавке производятся при открытой плавильной камере. В печах полунепрерывного действия все эти операции производятся без нарушения вакуума в плавильной камере печи, причем печи этого типа в случае необходимости могут работать и в периодическом режиме.

Индукционные печи в зависимости от их емкости могут работать на сетевой, средней или высокой частоте. Обычно для лабораторных печей малой емкости используют частоту порядка 10000 Гц. Печи средней емкости работают на частоте около 4000 Гц и крупные печи в интервале 500 – 1000 Гц.

Выбор рабочей частоты генератора, геометрических параметров индуктора (диаметра, высоты), количества витков их сечения зависит от

требуемой электрической мощности, а также от свойств и размеров переплавляемых материалов. В качестве примера на рис. 29 приведена схема печи полунепрерывного действия.

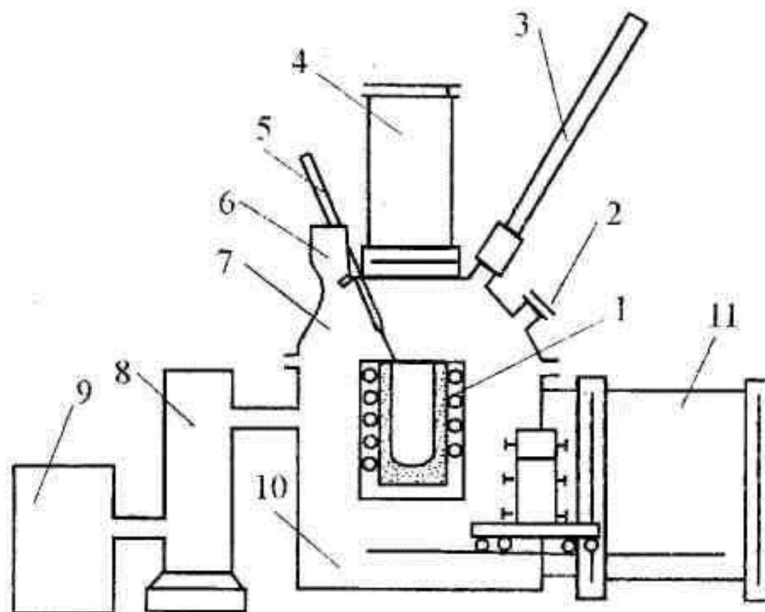


Рис. 29. Схема печи ОКБ571Б: 1 – тигель, 2 – гляделка, 3 – термопара, 4 – камера загрузки шихты, 5 – ломик для осаживания шихты, 6 – дозатор, 7 – съемная крышка, 8 – бустерный насос, 9 – фаорвакуумный насос, 10 – камера, 11 – камера охлаждения

Для загрузки шихты без нарушения вакуума печь оборудуется загрузочной шлюзовой камерой, расположенной над плавильной и отделяемой вакуумным технологическим затвором.

Легирующие и раскислители вводят через дозатор с откидными крышками. Дозатор представляет собой цилиндрическую камеру, в нижней части переходящую в конус. Дозатор, как и загрузочная камера, отделен от печной камеры технологическим вакуумным затвором. Секции дозатора снабжены откидными доньшками. В каждую секцию помещают необходимые материалы в той последовательности, в какой их вводят в расплав. После откачки дозатора открывают вакуумный затвор и поворотом рукоятки, установленной на крышке дозатора, доньшки секции освобождаются и

откидываются, а присаживаемый материал через промежуточный лоток, находящийся в плавильной камере, попадает в тигель.

Вакуумный дуговой переплав (ВДП). Дуговые печи делятся на печи с нерасходуемыми электродами (обычно из вольфрама или графита) и печи с расходуемыми (расплавляемыми) электродами, имеющими тот же состав, что и получаемый металл. Печи с нерасходуемыми электродами применяются для выплавки тугоплавких металлов из шихты соответствующего состава, имеют сравнительно небольшие размеры и распространены незначительно. Для стали, титана и ряда сплавов применяются преимущественно печи с расходуемыми электродами. В этих печах металл полностью затвердевает в водоохлаждаемом кристаллизаторе, образуя слиток (рис. 30).

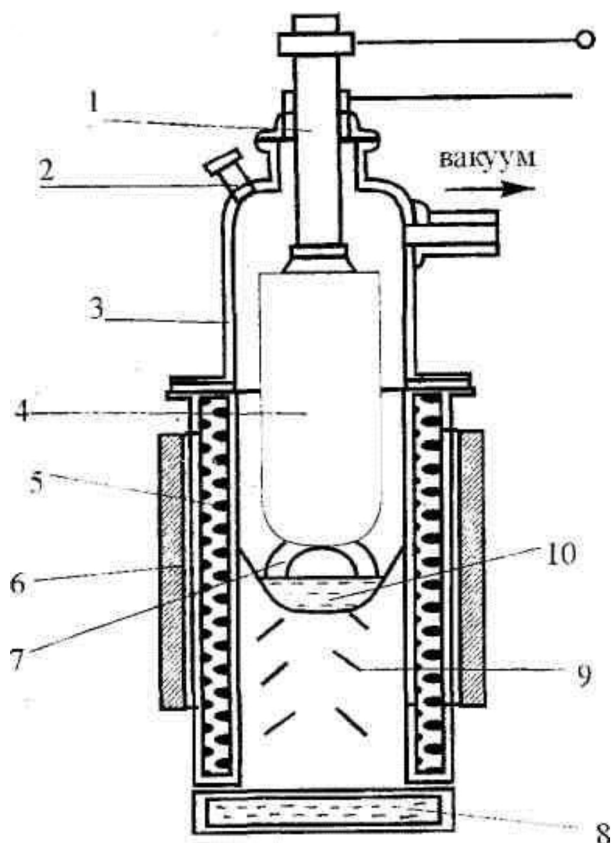


Рис. 30. Вакуумная дуговая печь: 1 – шток; 2 – гляделка; 3 – крышка; 4 – расходуемый электрод; 5 – кристаллизатор; 6 – соленоид; 7 – электродуга; 8 – поддон; 9 – слиток; 10 – ванна жидкого металла

Расходуемый электрод является катодом, он приварен к штоку. Слиток направляется в водоохлаждаемый кристаллизатор, закрытый крышкой с

гляделькой. Электрическая дуга горит между электродом и небольшой ванной жидкого металла. Для концентрации дуги и предотвращения перехода разряда на стенку кристаллизатора он окружен соленоидом с продольным магнитным полем. Металлическая "затравка", с помощью которой первоначально зажигается дуга электрическая, располагается на водоохлаждаемом поддоне. Положительный полюс от источника тока присоединяется к верхней части кристаллизатора.

Отечественные печи рассчитаны на массу слитков от 175 кг до 37 т.

Электрошлаковый переплав. Схема принципиальной установки показана на рис. 31.

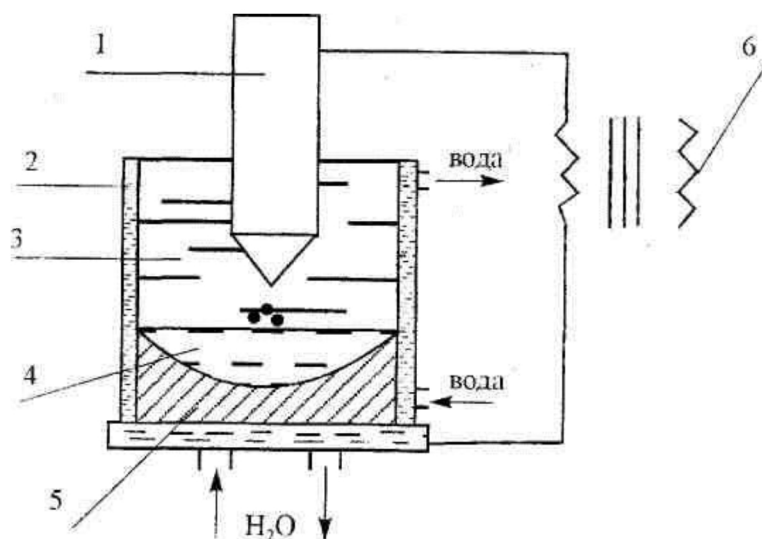


Рис. 31. Схема ЭШП: 1– расходный электрод; 2 – кристаллизатор; 3 – шлак; 4 – ванна металла; 5 – слиток; 6 – источник питания

Суть способа состоит в следующем. При прохождении переменного тока через слой шлака с большим электросопротивлением выделяется тепло, которое расплавляет расходный электрод. Капли металла, проходя через слой шлака, очищаются от оксидных и сульфидных включений. Основу шлака (флюса) составляет CaF_2 с добавками различных оксидов (CaO , Al_2O_3 и др.).

Преимущество способа: небольшие по размеру капли металла имеют большую контактную поверхность со шлаком, что ведет к рафинированию металла. При ЭШП балл по оксидным и сульфидным уменьшается вдвое, растет пластичность, вязкость и другие механические свойства.

Электрошлаковому переплаву необходимо подвергать шарикоподшипниковые стали, жаропрочные сплавы, конструкционные сплавы авиационного назначения.

Для получения сверхкрупных слитков в институте имени Е.О. Патона разработан способ порционной электрошлаковой отливки (ПЭШО). Способ состоит в следующем.

В водоохлаждаемом кристаллизаторе с помощью нерасходуемых электродов расплавляется шлак. Электроды поднимаются и заливается первая порция металла. Залитый металл затвердевает под слоем шлака. Затем заливают следующую порцию металла, он смешивается с остатком жидкого металла первой порции и также затвердевает. Так повторяют несколько раз до заполнения изложницы.

Электронно-лучевой переплав (ЭЛП). В электронно-лучевых печах плавление шихты производится за счет энергии, которая выделяется при резком торможении свободных электронов. Пучок этих электронов направлен на металл (шихту). Принципиальная схема такой установки показана на рис. 32.

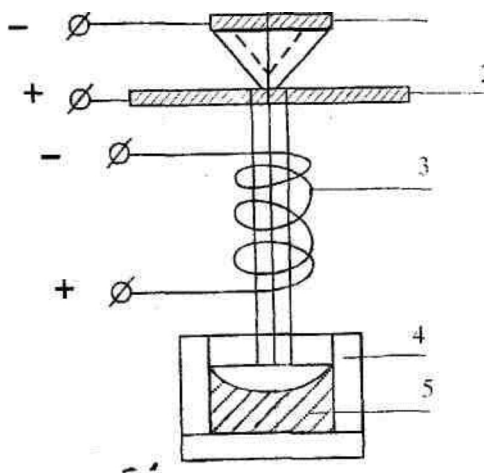


Рис. 32. Схема ЭЛП: 1 – катод, 2 – анод, 3 – фокусирующее устройство, 4 – кристаллизатор, 5 – слиток

В вакуумной камере ($10^{-4} \dots 10^{-5}$ мм рт. ст.) друг против друга находятся катод и анод. При нагреве катод испускает поток электронов, который концентрируется с помощью фокусирующих устройств. При торможении

этого пучка на металле выделяется энергия, которая расплавляет его. В качестве шихты используют прутки и сыпучие материалы.

В электронно-лучевых печах выплавляют слитки тугоплавких металлов (Mo, Nb, Ti, Zr), жаропрочных сплавов и сталей.

Плазменно-дуговой переплав (ПДП). В этих установках источником тепла является высокотемпературная плазма, т.е. ионизированный газ с температурой до 30000°C . Для этого применяют горелки с плазменной дугой, которая горит между катодом и шихтой.

Катод изготавливается из вольфрама. Он окружен водоохлаждаемым цилиндрическим соплом. Для образования плазменной дуги в зазор между катодом и соплом подается технический аргон (водород, гелий, азот). Анодом служит водоохлаждаемый медный электрод.

Емкость действующих плазменно-дуговых печей составляет от 25 кг до 10 т. Плавка идет практически без угара легирующих.

4.4. Внепечная обработка металла ("ковшовая" металлургия)

Обработка стали синтетическими шлаками производится с целью раскисления и десульфурации. Способ предложен в СССР А.С. Точинским (1925 г.) и во Франции Р. Перреном (1933 г.). Сущность способа состоит в том, что сталь с большой высоты выпускают в ковш, в который предварительно залит шлак. При этом шлак перемешивается со сталью, образуя эмульсию. Контактная поверхность шлака и металла резко возрастает, и процессы раскисления и обес-серивания идут во много раз быстрее, чем в печи. В состав шлака входят CaO и Al_2O_3 . Температура шлака $1650 - 1700^{\circ}\text{C}$.

Сталь, подлежащую обработке, подвергают сокращенной обработке в мартене, конверторе или электрической печи, состоящей в расплавлении, доводке (легировании) и удалении плавильного шлака. За счет сокращения времени плавки производительность агрегатов увеличивается примерно на 15%.

Указанный способ позволяет увеличить производительность плавильных агрегатов, уменьшить в 2 – 3 раза содержание серы, а также газов и неметаллических включений.

Внепечное вакуумирование осуществляется различными способами: в ковше, порционный, циркуляционный, в струе металла и др. На рис. 33 приведены два способа внепечного вакуумирования: в ковше и в струе металла.

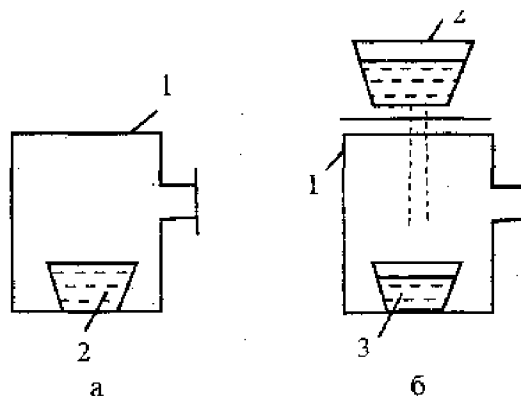


Рис. 33. Схемы способов внепечного вакуумирования: а – в ковше, б – в струе металла; 1 – вакуумная камера, 2 – ковш с металлом, 3 – ковш для вакуумированного металла

4.5. Фильтрация расплавов

Фильтрация – это процесс очистки расплавов от неметаллических включений. Процессы фильтрации основаны на механическом задерживании включений в расплавах или адгезии включений с материалом фильтра.

Для фильтрации алюминиевых и магниевых расплавов применяются следующие фильтры:

1. Сетчатые. Изготовлены из стеклоткани с размером ячеек от 0,5х0,5 до 1,5х1,5 мм.

2. Керамические делятся на зернистые (насыпные) и жесткие. Зернистые – это насыпка из зерен (шамот, магнезит, алунд, графит, хлориды и фториды металлов) высотой 100 – 150 мм. Жесткие – это пористая керамика (корунд) с размером пор около 0,3 мм.

3. Жидкие (электрофлюсовое рафинирование). Струя расплава Ø 5 – 7 мм, нагретая до 700 – 720°C, пропускается через слой жидкого флюса, толщиной 100 – 150 мм с наложением электрического постоянного тока силой 600 – 800 А с катодной поляризацией металла напряжением 6 – 12 В. Флюсы – фтористые соли.

5. ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО [3, 4, 5]

5.1. Общие сведения

Литейное производство заключается в изготовлении отливок путем заливки жидкого металла в особые литейные формы. Традиционный процесс литья состоит из следующих основных стадий:

- приготовление расплава (выплавка);
- изготовление литейной формы (процесс изготовления разовых песчаных форм называется формовкой);
- заливки и охлаждение отливки в форме;
- извлечение отливки из формы (выбивка, удаление стержней);
- обработка отливок (отрубка, очистка, зачистка, механическая и термическая);
- контроля качества отливок.

Продукция фасонно-литейного производства распределяется между отраслями промышленности примерно следующим образом: машиностроение – 60%, строительство – 20%, металлургия – 15%, остальное – 5%.

Все литейное производство делят на заготовительное и фасонное.

Заготовительное литьё служит для производства слитков и заготовок, предназначенных, главным образом, для процессов ОМД. Слитки – это отливки простой формы. Слитки получают литьём в изложницы непрерывными способами.

Фасонное литьё предназначено для производства деталей машин. Почти половина всех деталей машин, приборов, устройств и др. изготавливается способами литья. Всё фасонно-литейное производство можно разделить на 2 группы:

1. Литьё в разовые песчаные формы. На долю этого способа приходится около 80 % всех производственных отливок.

2. Специальные способы литья. К ним относятся: литьё в кокиль, центробежное литьё, литьё под давлением, литьё в керамические и оболочковые формы, литьё по выплавляемым моделям и др.

Кокиль – это металлическая форма. Керамическая форма изготавливается из специальной огнеупорной смеси. Формы по выплавляемым моделям изготавливаются также из смеси по разовой модели, которая затем выплавляется, растворяется или выжигается, поэтому различают литьё по выплавляемым, растворяемым и выжигаемым моделям. При литье под давлением применяют стальные пресс-формы. При центробежном литье применяют как разовые, так и многократные (металлические) формы.

Изложница – это металлическая форма для изготовления слитков.

5.2. Структура и строение металлических расплавов

Металлы в твёрдом состоянии характеризуются кристаллическим строением, т.е. периодичностью расположения атомов (ионов) в узлах кристаллической решётки. При температурах выше 0°K атомы совершают колебательные движения (тепловые колебания). При комнатной температуре величина колебаний составляет 5 – 10% от межатомного расстояния с частотой $3 - 10^{12}$ Гц. При нагреве увеличивается интенсивность колебаний, растут некоторые свойства (внутренняя энергия, энтропия, объём и др.). При определенной температуре эти свойства увеличиваются резко и скачкообразно, межатомное расстояние нарушается и металл переходит в жидкое состояние. Таким образом, плавление – это фазовое превращение, когда меняется порядок расположения атомов [7-10].

Дальний и ближний порядок расположения атомов в твердом и жидком металле

В жидком металле атомы расположены не столь хаотично как в газах, но и не имеют такого порядка расположения, как в твёрдом металле. Для жидкого металла характерен ближний порядок, т.е. система расположения атомов, распространяющихся на несколько межатомных расстояний. Для твёрдого

состояния характерен дальний порядок, т.е. система расположения атомов, распространяющихся до микро- и даже макроскопического уровня. Жидкий металл представляет собой множество групп атомов, где каждая группа – это центральный атом, вокруг которого располагаются соседи. В каждой группе атомы обмениваются с другими группами, а сами группы постоянно перемещаются по времени и в пространстве.

При переходе в жидкое состояние резко изменяются свойства, например, объём металла увеличивается на 3 – 4 %. Это соответствует увеличению межатомного расстояния на 1 %. Некоторые металлы и полуметаллы с явно выраженной ковалентной связью в твёрдом состоянии имеют некомпактную решётку и при плавлении сжимаются. К ним относят висмут, олово, кремний, германий, галлий.

5.3. Технологические литейные свойства металлов и сплавов

К отливкам предъявляются требования по геометрии и свойствам. Всё это зависит от многих факторов, но определяющим является природа металла. Поэтому к литейным сплавам предъявляются требования по жидкотекучести, склонности к усадке, ликвации, трещиностойкости и др.

Жидкотекучесть

Жидкотекучесть - это способность жидкого металла заполнять полость литейной формы, чтобы чётко воспроизводить контуры отливок. В общем случае это заполняемость формы, которая зависит, главным образом, от природы сплава, материала литейной формы и технологии литья.

Жидкотекучесть в чистом виде определяется только природой сплава. Для того чтобы различать разнообразные металлы и сплавы по жидкотекучести, в отечественной практике установлены понятия нулевой, истинной, условной и практической жидкотекучести (по Ю.А. Нехендзи).

Нулевая жидкотекучесть определяется температурой, при которой расплав перестаёт течь. Эта температура между температурами ликвидуса и солидуса.

Истинная жидкотекучесть определяется одинаковым перегревом выше температуры нулевой жидкотекучести.

Условная жидкотекучесть определяется одинаковым перегревом выше температуры ликвидуса.

Практическая жидкотекучесть определяется при одинаковой температуре заливки.

Ниже на рис. 34 показаны температуры определяется указанных видов жидкотекучести.

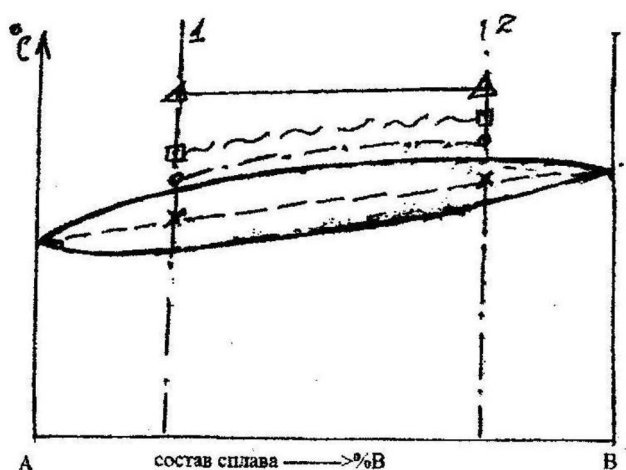


Рис. 34.

x---x – нулевая жидкотекучесть;

o-.-o – истинная жидкотекучесть;

□~~~□ – условная жидкотекучесть;

Δ__Δ – практическая жидкотекучесть

Жидкотекучесть определяется природой сплава, т.е. характером кристаллизации. Характер кристаллизации определяется ее интервалом, т.е. расстоянием между температурами ликвидуса и солидуса по горизонтали и вертикали. Чем шире интервал кристаллизации, тем лучше жидкотекучесть и наоборот (рис.35).

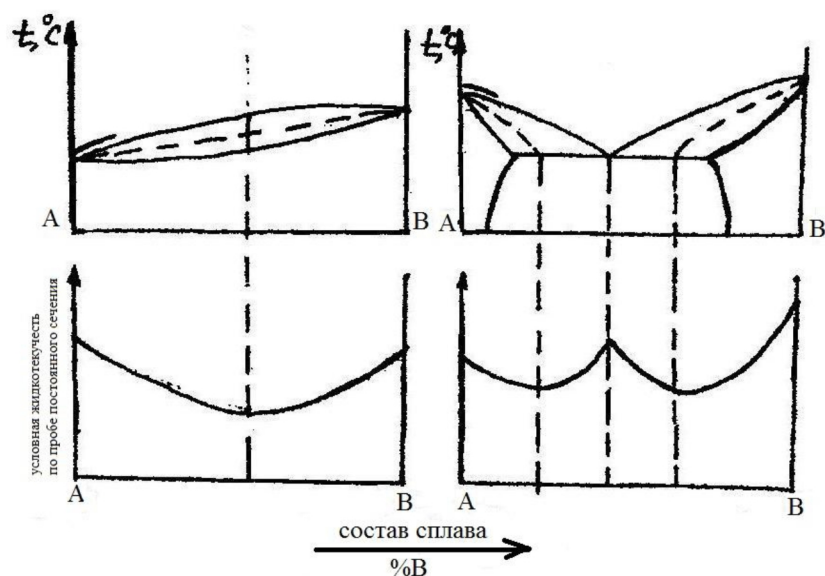


Рис. 35.

---- — условная жидкотекучесть;

— — — — нулевая жидкотекучесть;

На практике жидкотекучесть определяется методом проб. Все они делятся на пробы постоянного (спиральная, прутковая, U-образная) и переменного (клиновья, шариковая) сечений, а также комбинированные пробы.

Ниже приведены схемы прутковой (а) и клиновой (б) проб (рис. 36)

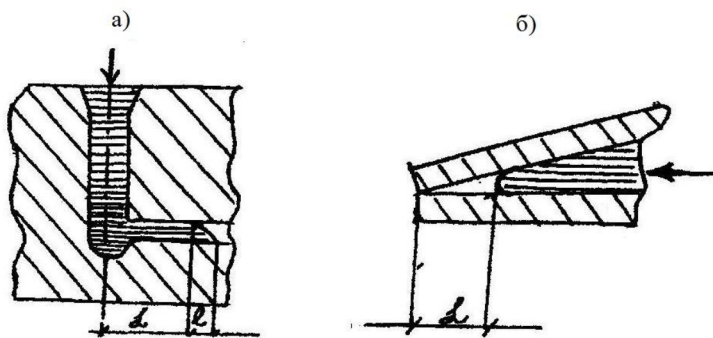


Рис. 36. L, l — меры жидкотекучести

Усадочные явления в отливках

Усадка – это свойство металлов и сплавов уменьшаться в объеме при охлаждении (около 3 – 4 %). Количественно различают объемную и линейную усадки:

$$y_V = \frac{V_{\Phi} - V_{\text{отл}}}{V_{\text{отл}}},$$

$$y_L = \frac{L_{\Phi} - L_{\text{отл}}}{L_{\text{отл}}},$$

где $V_{\Phi}, V_{\text{отл}}$ – соответственно, объемы формы (модели) и отливки;

$L_{\Phi} - L_{\text{отл}}$ – соответственно какой-либо линейный размер формы (модели) и отливки.

Следует различать усадку при различных температурах:

- усадка жидкого металла в интервале температур заливки и ликвидуса;
- усадка в интервале кристаллизации от температуры ликвидус до температуры солидус;
- усадка твёрдого металла ниже температуры солидуса.

Усадка жидкого металла и усадка в интервале кристаллизации оказывает существенное влияние на образование усадочных раковин и появления горячих трещин. Усадка твёрдого металла оказывает существенное влияние на формирование остаточных напряжений. Следствием такой усадки является коробление отливок и холодные трещины (рис. 37).

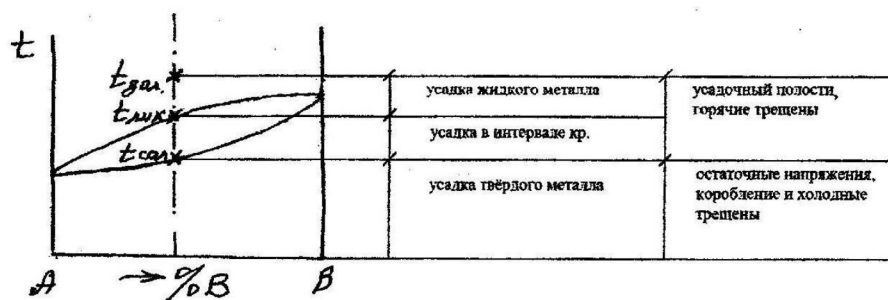


Рис. 37

Различают два вида усадочных полостей: усадочные раковины и усадочные поры.

Усадочные раковины – это полости крупных размеров, которые образуются в тех местах отливки, где застывают последние капли жидкости. Усадочные поры – это мелкие полости, поражающие обширную полость отливки. Вид усадочной полости определяется природой сплава, т.е. интервалом кристаллизации. Чем шире интервал кристаллизации, тем больший объём занимают поры, чем уже интервал, тем больший объём занимают раковины (рис. 38).

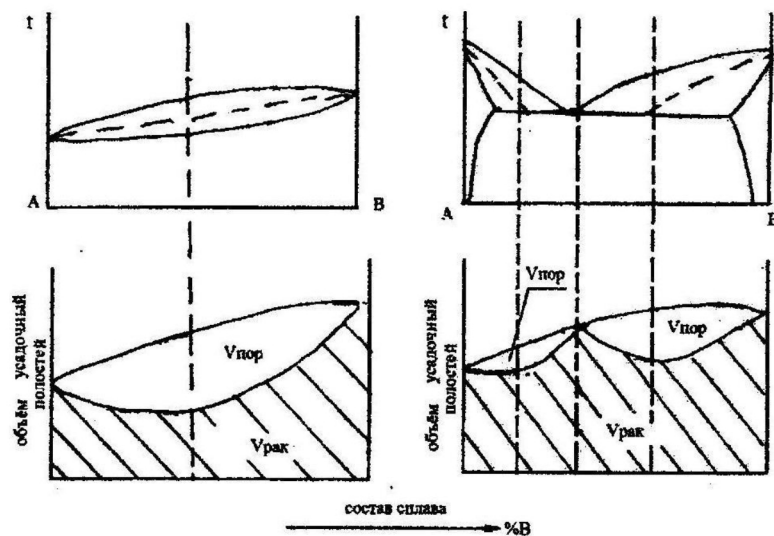


Рис. 38.

----- – нулевая жидкотекучесть;

— – условная жидкотекучесть;

$V_{\text{пор}}$, $V_{\text{рак}}$ – соответственно, объемы пор и раковин

Следует различать свободную (а) и затрудненную усадку (б). Затрудненная усадка обусловлена торможением – со стороны литейной формы. Ее называют литейной, и она определяет усадку конкретной отливки (рис. 39).

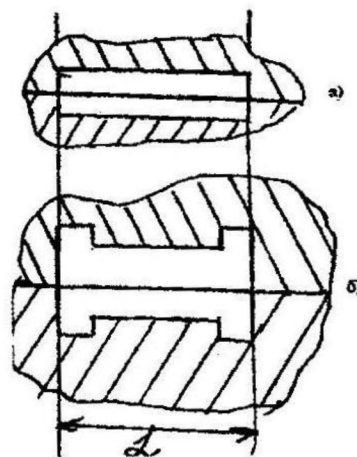


Рис. 39 а) – свободная усадка, б) – затрудненная (литейная) усадка

Усадочные раковины

В первоначальный момент усадка сопровождается понижением уровня жидкости, но как только образовалась твердая поверхностная корка, образуются усадочные полости. Усадка является следствием различия плотностей в твердом и жидком состояниях. Рассмотрим охлаждение простой отливки цилиндрической формы.

Последовательное образование слоев твердого металла I – III приводит к снижению уровней жидкости а, b, с (рис. 40).

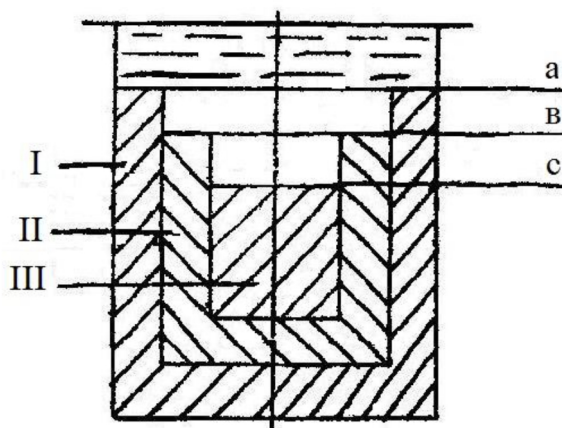


Рис. 40. I – III – последовательно кристаллизующийся металл, а, b, с – уровни жидкости

Результатом такого механизма затвердевания является образование усадочной раковины конусной формы.

Усадочную раковину обычно выводят из тела отливки в прибыли. Сложные фасонные отливки конструируют с несколькими прибылями.

Усадочные поры

Если расплав затвердевает в интервале, то механизм образования усадочных полостей резко усложняется. В этом случае по сечению отливки образуют 3 слоя: твердая поверхностная корка (1), переходная жидкостная фаза (2) и центральная жидкостная фаза (3) (рис. 41).

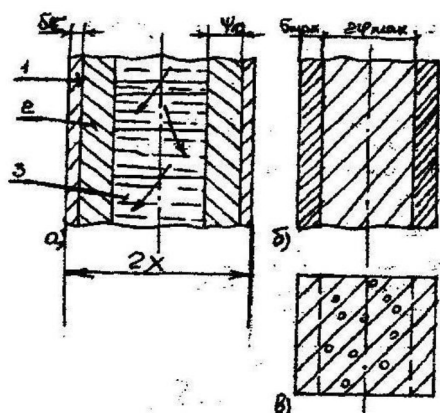


Рис. 41. X – толщина отливки бесконечной длины, δ_{τ} , $\delta_{\max}$, Ψ_{τ} , $\Psi_{\max}$ – текущие толщины по мере кристаллизации

В первые моменты, когда жидкость из центральной зоны может циркулировать и проникать к местам кристаллизации, полости залечиваются, и идёт образование усадочной раковины (а). Когда переходные зоны смыкаются с двух сторон, и пропадает жидкая фаза, возникают усадочные поры (б). Положение пористой зоны соответствует слиянию переходных зон с двух сторон (в). На практике важно знать размеры пористой зоны и методы уменьшения размеров этой зоны. Рассмотрим охлаждение простой отливки шириной $2X$ бесконечной длины. Соответствующие расчеты устанавливают определённую ширину пористой зоны по формуле:

$$\frac{\Psi_{\max}}{X} = \frac{\arccos \frac{V_{\text{сол}}}{V_{0,2}}}{\mu},$$

где $V_{\text{сол}} = t_{\text{сол}} - t_{\text{н.ф.}}$,

$$V_{0,2} = t_{0,2} - t_{\text{н.ф.}}.$$

где $t_{\text{н.ф.}}$ – начальная температура формы;

$t_{\text{сол}}$ – температура солидус;

$t_{0,2}$ – температура, соответствующая 20 % твердой фазы (находится из диаграммы состояния);

$$\mu \text{tg} \mu = B_i - \text{критерий } B_i = \frac{\alpha S}{\lambda};$$

α – коэффициент теплоотдачи;

λ – коэффициент теплопроводности;

S – характеристический размер отливки.

Основные меры уменьшения пористой зоны: выбор природы сплава с узким интервалом кристаллизации, выбор материала формы, рациональная технология (температура металла и форма).

Газы в отливках. Газовые раковины

В процессе выплавки, заливки и охлаждения отливки поглощают газы из окружающей среды. При этом газы могут находиться в свободном состоянии в газовых раковинах в виде химических соединений и адсорбированного слоя.

Газовые раковины представляют собой нарушение сплошности металла и характеризуется ровной и практически не окисленной поверхностью. В отличие от газовых, усадочные раковины имеют тёмную поверхность, покрытую дендритами. В зависимости от происхождения различают эндогенные и экзогенные газовые раковины.

Эндогенные газовые раковины

Эндогенные газовые раковины образуются при выделении газов из металла, когда газовый пузырь не успевает всплыть на поверхность. Сами пузыри образуются из газовых зародышей, возникающих гомогенно или

гетерогенно. Гомогенный способ – это самопроизвольное образование зародышей за счёт флуктуации атомов. Этот механизм характерен только для идеально чистых металлов. Рассмотрим условие зарождения таких центров (рис. 42).

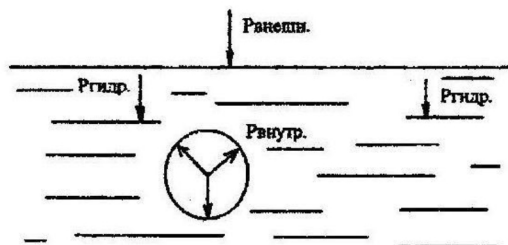


Рис. 42.

Газовый зародыш способен расти при условии:

$$P_{\text{внутр}} - (P_{\text{внешн}} - P_{\text{гидр}}) \geq P_{\text{разр}},$$

где $P_{\text{внутр}}$, $P_{\text{внешн}}$, $P_{\text{гидр}}$, $P_{\text{разр}}$ – соответственно давления внутреннее, внешнее, гидростатическое и разрыва металла. Соответствующие расчеты показывают, что газовые пузыри в сталях и чугунах могут возникнуть при внутренних давлениях 2000 атм.

На практике зарождение центров идёт гетерогенным путём, т.е. на готовых поверхностях раздела. В качестве таких поверхностей могут выступать: стенки форм и тиглей, неметаллические включения, фронт кристаллизации.

Теория капиллярности даёт следующее соотношение для расчёта диаметра газового пузыря в момент отрыва от поверхности зарождения:

$$d = 0,002 \cdot \Theta \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma_1 - \gamma_2}},$$

где Θ – краевой угол смачивания; σ – поверхностное натяжение; γ_1, γ_2 – плотности металла и газов соответственно.

На практике можно регулировать газовую пористость эндогенного происхождения с помощью следующих факторов: окружающей средой (плавка в аргоне или в вакууме), состоянием шихты (шихта не должна быть

окисленной, поэтому при необходимости поверхность шихты следует очищать от окислов механическим путём, промывкой, сушкой, прокалкой или обжигом), температурой расплава.

Экзогенные газовые раковины

Они возникают при проникновении газов извне, например, из формы. Основными источниками раковин такого происхождения могут быть:

- воздух, находящийся между стенками формы и отливкой (при заливке происходит резкий нагрев, давление воздуха повышается, и под этим давлением он заталкивается в отливку);
- сгорание органических соединений, содержащихся в формовочной и стержневой смесях;
- разложение гидратов в смесях;
- испарение влаги.

Основными методами борьбы с экзогенными раковинами являются:

- снижение газотворности форм и стержней (газотворность характеризует формы, как источник газов); для снижения газотворности формы стержней необходимо отказаться от органических и водосодержащих крепителей, а также различных связующих (например, древесных опилок);
 - повышение газопроницаемости формы (газопроницаемость – это способность стержневых и формовочных смесей пропускать газы);
- Важнейшими способами повышения газопроницаемости и снижения газотворности является отжиг, сушка или прокалка форм и стержней.

На практике коэффициент газопроницаемости смесей определяют по следующей методике (рис. 43). В металлическую гильзу (1) запрессовывают образец (2) смеси для форм или стержней диаметром и высотой 50 мм. Через этот образец пропускается под небольшим избыточным давлением 2000 см^3 воздуха. Давление измеряется манометром (3), а время истечения воздуха (т) определяется по секундомеру.

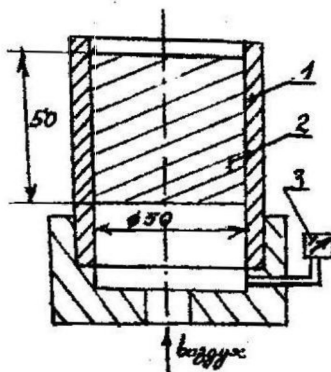


Рис. 43. Определение газопроницаемости формовочных и стержневых смесей

Коэффициент газопроницаемости высчитывается по формуле:

$$K = \frac{v \cdot h}{P_{\text{изб}} \cdot F \cdot \tau},$$

где $P_{\text{изб}}$ – избыточное давление воздуха;

V – объем воздуха;

h – высота образца;

τ – время истечения.

При стандартных условиях коэффициент газопроницаемости равен:

$$K = \frac{500}{P_{\text{изб}} \cdot \tau}.$$

Ликвационные явления в отливках

Ликвация – это химическая неоднородность металлов и сплавов. Она проявляется в пределах зерна и в различных частях отливки. В первом случае – это внутрикристаллическая или дендритная ликвация, во втором – зональная.

Дендритная ликвация

Является следствием неравновесной кристаллизации (образуются кристаллы неравновесной формы). Типичной формой таких кристаллов является дендритная. Подобное строение литых металлов во многом определяет свойства изделий и поведение металлов при различных видах обработки (например, ОМД). При пластической деформации литого металла

вследствие дендритной ликвации возникает полосчатая структура. Это приводит к резкой разнице в свойствах материала вдоль и поперёк направления деформации. Дендритная ликвация существенно ухудшает коррозионную стойкость изделий. Дендритная ликвация устраняется высокотемпературным диффузионным отжигом, который называется гомогенизацией.

Зональная ликвация

В этом случае неравномерность состава проявляется в отдельных частях отливки вдоль поперечного сечения, так и по высоте отливки, слитка. Различают 3 вида зональной ликвации:

1. Прямая зональная ликвация. В этом случае концентрация ликвирующих элементов возрастает от периферии к центру. Данному виду ликвации подвержены как цветные, так и железоуглеродистые сплавы. Но главным образом, ей подвержены стали и чугуны. Ликвирующими элементами в них являются углерод, сера и фосфор.

2. Обратная зональная ликвация. В этом случае ликвирующими элементами более обогащены не центральные, а поверхностные слои отливки. Этому виду ликвации подвержены, главным образом, цветные сплавы.

3. Ликвация по удельному весу (гравитационная ликвация). Это ликвация по высоте отливки, которая объясняется тем, что в процессе кристаллизации образующиеся фазы имеют различную плотность. Тяжёлые кристаллы погружаются, а лёгкие всплывают.

Особенностью всех видов зональной ликвации является то, что они не устраняются диффузионным отжигом, так как распространяются на десятки-сотни миллиметров. Можно только изменить характер распределения зональной ликвации путём регулирования скорости и направления теплоотвода.

5.4. Литьё в разовые песчаные формы

Литейной формой называется специально изготовленный сосуд, внутренние очертания которого соответствуют очертаниям требуемой отливки. Процесс изготовления разовых песчаных форм называется формовкой. Формовка бывает ручной и машинной. Для оформления отверстий и полостей в отливках применяют стержни. Их изготавливают в специальных стержневых ящиках. Разовые песчаные формы и стержни изготавливают из песчано-глинистых смесей. Формы и стержни работают в тяжёлых условиях:

- жидкий металл оказывает давление на стенки формы, и поэтому могут искажаться размеры и форма полости;
- при заливке горячего расплава происходит резкий разогрев стенок формы и возникает термический удар, который может вызвать структурные изменения свойств материала формы;
- химическое взаимодействие расплава с материалом формы.

В ещё более тяжёлых условиях находятся стержни, так как они погружены в расплав.

К формовочным материалам и смесям предъявляется комплекс следующих требований:

- теплофизические свойства (теплопроводность, теплоёмкость, теплоаккумулирующая способность);
- механические свойства (прочность, поверхностная прочность или осыпаемость, пластичность, податливость);
- газообменные свойства (газопроницаемость);
- технологические свойства (сыпучесть, негигроскопичность, выбиваемость, непригораемость, долговечность).

Следует различать исходные формовочные материалы и смеси.

Исходные формовочные материалы

Делятся на основные и вспомогательные. К основным относят пески и глины.

Пески

Основу формовочных смесей составляет кварцевый песок. Кварц – это полиморфная модификация кремнезёма (SiO_2). В состав песков входят кремнезём, глинистая составляющая, вредные примеси (Na_2O , Fe_2O_3 и др.). Если пески содержат не менее 90% SiO_2 , они называются кварцевыми и маркируются 1К – 4К. Если пески содержат менее 90% SiO_2 , они называются кварцево-полевошпатными (КП).

В зависимости от содержания глинистой составляющей пески делятся на следующие классы:

- Т – тощий песок,
- П – полужирный песок,
- Ж – жирный песок,
- ОЖ – очень жирный песок.

Глины

Служат для связывания зёрен песка. Если глины содержат минерал каолинит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), они называются каолитными (К). Глины, содержащие минерал монтмориллонит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + n\text{H}_2\text{O}$), называются монтмориллонитовыми (М). В зависимости от связующей способности глины делятся на 3 сорта (I, II, III) и 3 класса (1, 2, 3). Термохимическая устойчивость или непригораемость определяется содержанием вредных примесей. Поэтому признаку глины делятся на 3 группы (T_1 , T_2 , T_3).

Смеси

Смеси готовят из исходных формовочных материалов и отработанных смесей. Различают формовочные, стержневые, специальные и вспомогательные смеси.

Формовочные смеси служат для изготовления форм. Их состав зависит от сплава, размеров и характера формы (сухие или сырые формы). Формовочные смеси бывают, облицовочные, наполнительные, единые, отработанные.

Стержневые смеси служат для изготовления стержней. Их состав зависит от материала отливки, размеров и форм стержня, положения стержня в форме.

Специальные смеси – это смеси, в которых песок заменён другим материалом (например, хромит, циркон, хромомagnesит и др.), и смеси, в которых связывающим является жидкое стекло.

Вспомогательные смеси – это смеси, которые наносятся на поверхность форм и стержней с целью повышения качества поверхности отливок. Для этого применяют противопригарные краски для сухих форм и противопригарные припылы для сырых форм.

Приготовление формовочных и стержневых смесей

Пески сушат при температуре около 250°C, а затем просеивают через сита. Монтмориллонитовые глины сушат при температуре 120°C, а остальные глины - при температуре 200 – 250°C, а затем размельчают. Смеси готовят в специальных машинах, называемых бегунами. Технологический процесс приготовления смеси состоит из следующих операций:

- 1) перемешивание составляющих смесей;
- 2) увлажнение;
- 3) вылёживание;
- 4) разрыхление.

Модельно-опочная оснастка

Служит для изготовления форм и стержней. В состав оснастки входят модельный комплект и опоки.

Модельный комплект

В состав комплекта входят модели отливок, модели литниковой системы, модельные и подмодельные плиты и стержневые ящики. Модели изготавливаются из дерева и металлических сплавов, чаще всего из алюминиевых.

Опоки

Это жёсткие металлические рамки, в которые набивается и уплотняется смесь. Опоки изготавливают чаще всего из чугуна и стали.

Литниковые системы

Это системы каналов, по которым расплав поступает в полость литейной формы. Обычно литниковые системы имеют следующие элементы (рис. 44).

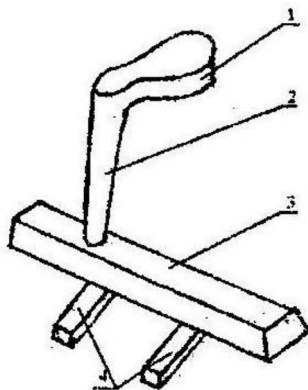


Рис. 44. Элементы литниковой системы: 1 – литниковая чаша, 2 – стояк, 3 – шлакоуловитель, 4 – питатели

Литниковая чаша служит для облегчения попадания струи металла и очистки расплава от грубых неметаллических включений. Стояк – это вертикальный канал, по которому расплав поступает в шлакоуловитель. Для удобства формовки стояк изготавливается сужающимся к низу. Нормальная работа шлакоуловителя обеспечивается при выполнении условия: $F_{ст} > F_{ш} > \Sigma F_{пит.}$. – Питатели непосредственно подводят металл в полость литейной формы. К ним предъявляются два противоречащих требования:

- 1) они должны быть тонкими для облегчения удаления из отливки;
- 2) они должны быть массивными, чтобы металл не остывал при заполнении формы.

Изготовление литейных форм (формовка)

В зависимости от способа изготовления форм различают ручную и машинную формовку.

Ручная формовка

Применяется при уникальном, индивидуальном и мелкосерийном производствах. При ручной формовке применяют специальный инструмент и приспособления: ручные и пневматические трамбовки, сито, лопаты, гладилки, вентиляционные иглы (душники) и др. Различают много способов ручной формовки (более 20). Наиболее широко в производстве применяют ручную формовку в двух опоках по разъёмной и неразъёмной моделям.

Последовательность такой формовки представлена на рис. 45 и 46.

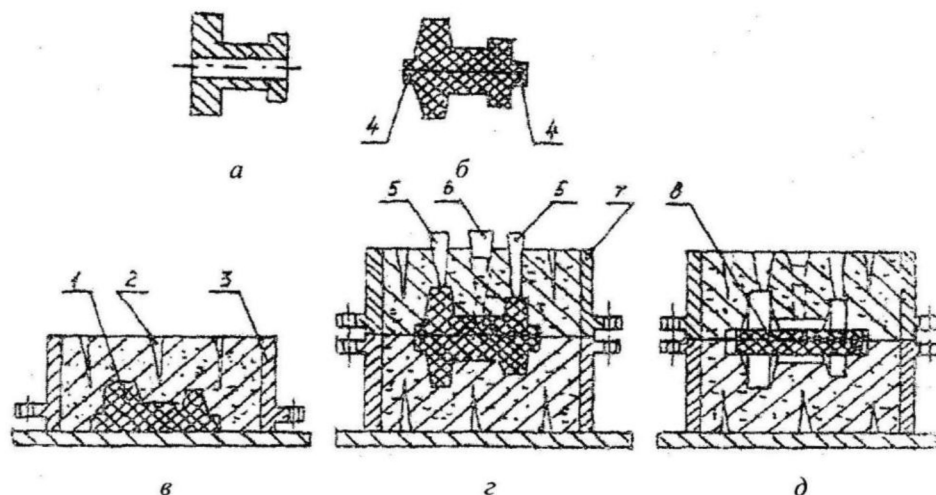


Рис. 45. Последовательность операций при формовке в двух опоках по разъёмной модели: а) – деталь, б) – разъёмная модель, в), г) – изготовление нижней и верхней полуформ, д) – форма в сборе; 1 – половина модели, 2 – вентиляционные каналы, 3 – нижняя опока, 4 – стержневые знаки, 5 – модели выпоров, 6 – модель литниковой системы, 7 – верхняя опока, 8 – стержень

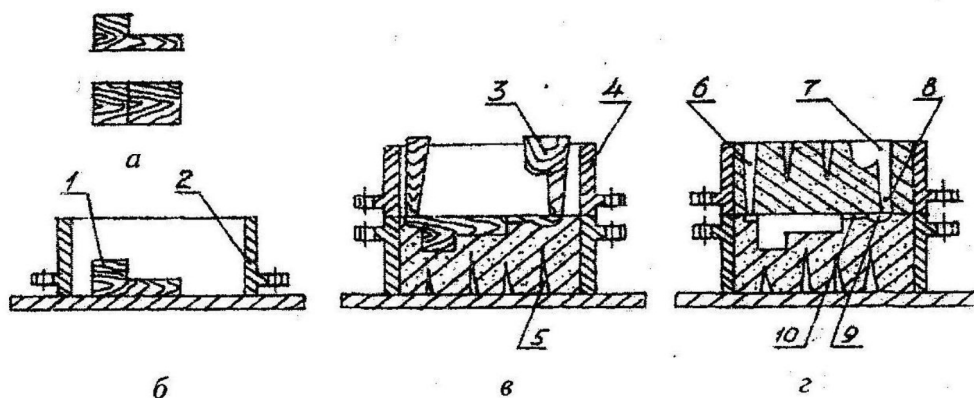


Рис. 46. Последовательность операций при формовке в двух опоках по неразъемной модели: а) – модели отливки, б), в) – изготовление нижней и верхней полуформ, г) – форма в сборе; 1 – модель отливки, 2 – нижняя опока, 3 – модель литниковой системы, 4 – верхняя опока, 5 – вентиляционные каналы, 6 – выпор, 7 – литниковая чаша, 8 – стояк, 9 – шлакоуловитель, 10 – питатели

Машинная формовка

Все формовочные машины классифицируются по следующим признакам:

1) по способу приведения их в действие (гидравлические, пневматические, электрические);

2) по способу уплотнения формовочной смеси (прессовые (бывают с верхним и нижним прессованием), встряхивающие пескомёты, пескодувные, пескострельные);

3) по способу извлечения моделей. Схемы некоторых машин приведены на рис. 47.

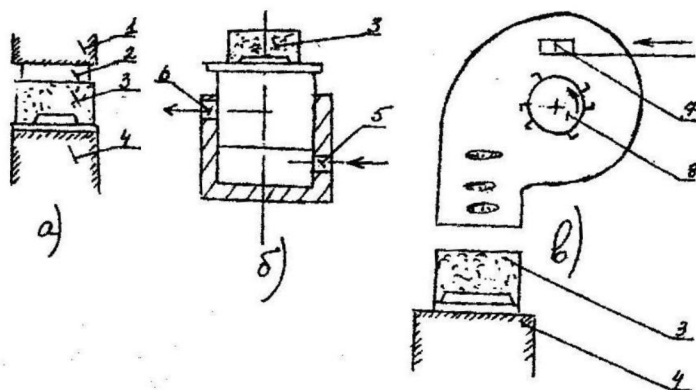


Рис. 47. Схема формовочных машин с верхним прессованием (а), встряхивающей (б), головки пескомёта (в): 1 – верхняя траверса, 2 – прессовая колодка, 3 – со смесью, моделью и модельной плитой, 4 – стол машины, 5, 6 – соответственно впускные и выпускные отверстия для воздуха, 7 – транспортер для подачи смеси, 8 – ротор с лопатками

Пескодувные машины

В них формовочная или стержневая смесь под большим давлением воздуха вдувается в опоку или стержневой ящик.

Пескострельные машины

Разновидность пескодувных машин. Здесь смесь уплотняется мгновенным перемещением под давлением воздуха.

По способу извлечения моделей из форм применяются машины со штифтовым съёмом, с протяжкой модели, с поворотной плитой, с перекидным столом и др. На рис. 48 показаны схемы некоторых из таких машин.

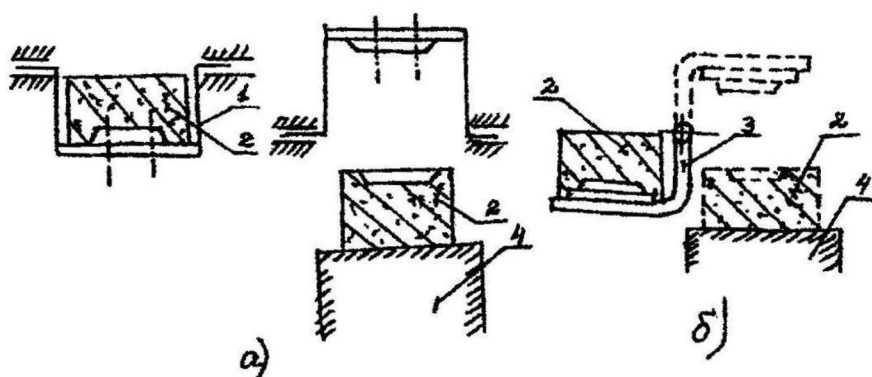


Рис. 48. Схемы машин с поворотной плитой (а) и перекидным столом (б): 1 – поворотная плита, 2 – опока со смесью, 3 – перекидной стол, 4 – стол машины

Особенности изготовления стержней

Стержни работают в более тяжёлых условиях, чем формы. Если в форме работают, главным образом, поверхностные слои полости, то стержни работают в объеме, т.к. они погружены в расплав. Всё это требует их вентиляции и армирования. Стержни изготавливаются в стержневых ящиках с помощью обычных формовочных машин, чаще всего пескоструйных и пескострельных.

Сушка форм и стержней

Производится с целью повышения прочности, газопроницаемости, а также для снижения газотворности.

Сушке подвергаются все стержни и часть форм (другая часть заливается в сырые формы). Применяются следующие способы сушки:

1. Объемная сушка. Производится в печах периодического или методического действий. Режим сушки зависит от состава смеси и их габаритов.

2. Поверхностная подсушка. Производится с помощью инфракрасных лучей (мощная электролампа) и горелок.

3. Применение быстросохнущих смесей. Для ускоренного изготовления форм применяют следующие смеси:

а) пластичные самотвердеющие смеси (ПСС). Их готовят на основе жидкого стекла. В состав смеси входят песок, глина, молотый уголь, феррохромовый шлак.

б) жидкоподвижные самотвердеющие смеси (ЖСС). В их состав входит песок, феррохромовый шлак, жидкое стекло, вода, ПАВы.

в) холоднотвердеющие смеси (ХТС). Они состоят из песка, связующего и катализатора. В качестве связующих применяют смолы (например, фенолформальдегидную смолу). Катализатором служит ортофосфорная кислота.

5.5. Специальные способы литья

Общая характеристика специальных способов литья

Специальными называют способы литья, которыми получают отливки без применения разовых песчаных форм. Все способы спецлитья можно классифицировать по разным признакам. По продолжительности работы литейных форм все спецвиды литья можно разделить на следующие группы [7-10]:

1) способы, основанные на применении разовых форм (литьё по выплавляемым моделям, литьё в керамические и оболочковые формы и др.);

2) способы, основанные на применении многократных форм (литьё в кокиль, литьё под давлением и пр.);

3) способы, допускающие применение как разовых, так и многократных форм (например, центробежное литьё).

Спецспособы литья позволяют получать отливки с требуемой геометрией высокой точности, качеством поверхности и необходимым уровнем физико-химических и механических свойств. Для этих способов характерен высокий КИМ. Если при литье в разовые песчаные формы (15 – 25)% веса отливки идёт на стружку при механической обработке, то спецспособы позволяют сократить эту величину до (5 – 7)% или получать отливки с готовыми или почти готовыми размерами, требующими только финишных операций.

Рассмотрим некоторые специальные способы литья, применяемые в машиностроении и, в частности, авиационной технологии.

5.5.1. Литьё в кокиль

Кокиль – это литейная форма, изготовленная из металлических сплавов (чугун, сталь, алюминиевые сплавы). Кокильное литьё позволяет получать как простые отливки, так и фасонные со сложными полостями. Полости в отливках оформляются песчаными или металлическими стержнями. Кокили бывают неразъёмные (вытряхные) и разъёмные. Кокили с песчаными стержнями используют, как правило, для чугунного и стального литья, а с металлическими – для цветного (Al, Mg). Металлические стержни удаляют из отливки до извлечения кокиля. Чтобы легче извлечь стержень, последний делают составным (рис.49).

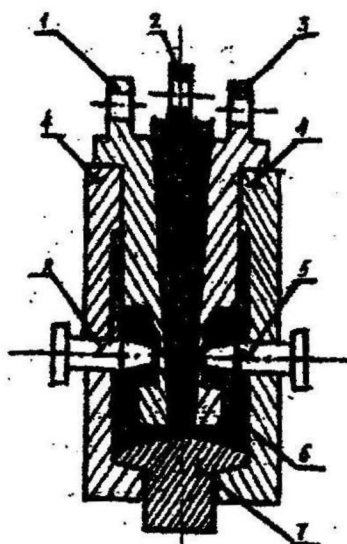


Рис. 49. Кокиль для отливки с разъемным металлическим стержнем: 1, 3 – разъемные стержни, 2 – клинообразный фиксатор, 4 – оболочка кокиля, 5, 8 – стержни для получения отверстий, 6 – поршень, 7 – основание кокиля

Охлаждение кокилей может быть естественным или принудительным (например, обдувка воздухом). Механизмы для раскрывания кокилей – рычажные или винтовые. Применяются также полностью механизированные кокили с принудительным охлаждением, электрическим подогревом.

При производстве чугунных и стальных отливок применяют облицованные кокили. При этом кокиль имеет приблизительные очертания отливки, а нагреваемая модель – точные размеры отливки. В зазор между кокилем и моделью, нагретыми до 250°C , вдувается плакированная песчаная смесь (песчаносмоляная или керамическая смесь). После отверждения на поверхности кокиля остаётся облицованный слой толщиной 5 – 15 мм. После изготовления отливки слой удаляют дробоструйной обработкой и наносят новую облицовку. Схема получения облицованного кокиля показана на рис. 50.

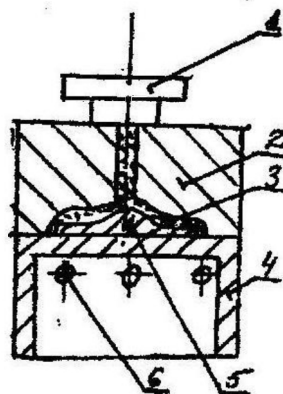


Рис. 50. Схема облицовки кокиля: 1 – пескоструйная головка, 2 – кокиль, 3 – облицовка, 4 – плита, 5 – модель, 6 – нагреватели

Различают 3 способа подвода металла в кокиль: сверху через прибыль или выпор, снизу (сифоном) через стояк и через щелевой питатель (рис. 51).

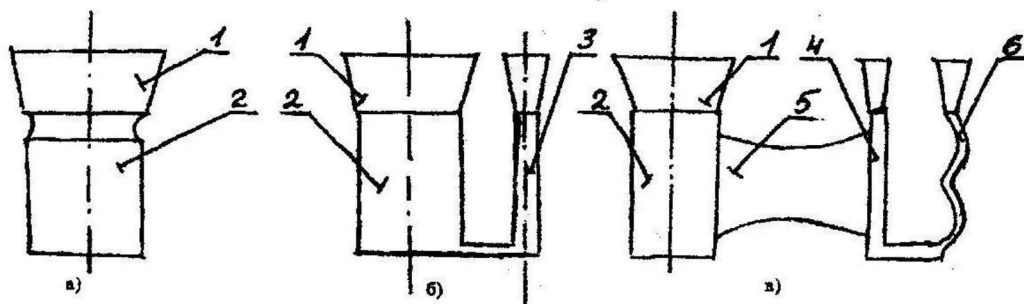


Рис. 51. Подвод металла сверху через прибыль, выпор (а), снизу сифоном (б), щелевой питатель (в); 1 – прибыль (выпор), 2 – отливка, 3 – стояк, 4 – вертикальный канал, 5 – щелевой питатель, 6 – зигзагообразный стояк

Сплавы для литья в кокиль: алюминиевые сплавы, магниевые сплавы, медные сплавы (бронзы Бр. ОСЦ5-5-5; Бр. ОСЦ6-6-3; Бр.ОФ10-1; Бр.ОС10-1; АМу9-2; Бр.АЖ9-4; латуни кремнистые типа ЛК80-3Л), чугуны, стали углеродистые марок 15Л-45Л, иногда из легированных сталей.

Основные особенности литья в кокиль

1. Скорость охлаждения отливок в металлических формах в 3-10 раз выше, чем при литье в песчаные формы. Это обуславливает мелкозернистую структуру отливок и повышает их свойства.

2. Чугунные отливки характеризуется Наличием отбелённого поверхностного слоя и остаточными напряжениями. Поэтому их необходимо отжигать.

3. Трудность в изготовлении фасонных стальных отливок (образование трещин в отливке, низкая стойкость кокилей).

4. Высокое качество поверхности и точность по размерам отливок.

5. Малые припуска на механическую обработку.

6. Лучшие условия труда, малая трудоёмкость по сравнению с разовыми песчаными формами.

5.5.2 Литъё под давлением

Суть метода состоит в следующем: жидкий металл под давлением через тонкий щелевой питатель подаётся в стальную разъёмную форму, называемую пресс-формой. После застывания отливки пресс-форма раскрывается и отливка выталкивается.

Сейчас применяются следующие типы машин литья под давлением:

а) с холодной горизонтальной камерой прессования (рис. 52);

б) с холодной вертикальной камерой прессования (рис. 53);

в) с горячей вертикальной камерой прессования

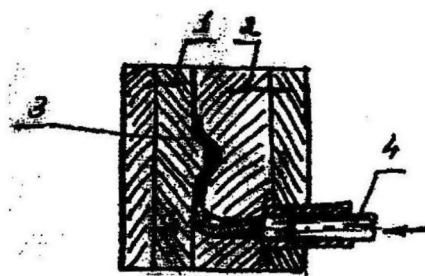


Рис. 52. Схема машины с холодной горизонтальной камерой прессования: 1 – подвижная полуформа, 2 – неподвижная полуформа, 3 – отливки, 4 – плунжер

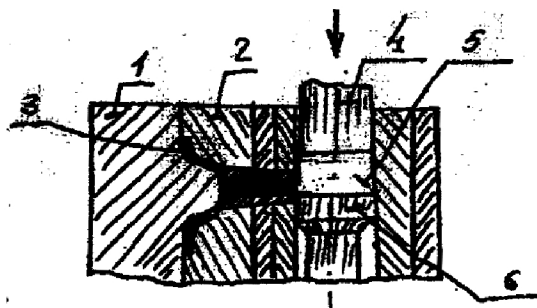


Рис. 53. Схема машины с холодной вертикальной камерой: 1 – подвижная полуформа, 2 – неподвижная полуформа, 3 – отливка, 4 – плунжер, 5 – расплав, 6 – пята

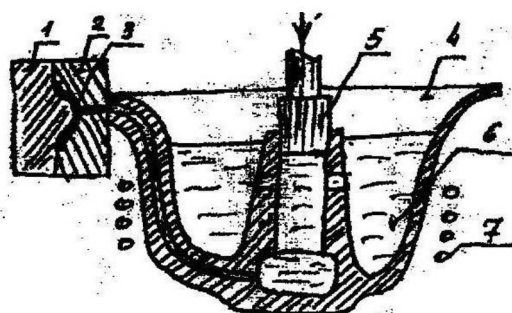


Рис. 54. Схема машины с горячей вертикальной камерой прессования: 1 – подвижная полуформа, 2 – неподвижная полуформа, 3 – отливки, 4 – тигель, 5 – плунжер, 6 – расплав, 7 – нагреватель

Рекомендуемые сплавы для литья под давлением

1. Цинковые сплавы: ЦА4; ЦА0,1; ЦАМ1; ЦАМ4-3; ЦАМ4-1; ЦАМ5-10.
2. Алюминиевые сплавы: АЛ13; АЛ22; АЛ23; АЛ23-1; АЛ27; АЛ27-1; АЛ28; АЛ29 (система Al-Mg); АЛ2; АЛ4; АЛ9 (система Al-Si); АЛ3; АЛЗВ; АЛ6 (система Al-Si-Cu); А11 и др. (А1 - прочие компоненты).
3. Магнитные сплавы: МЛ5; МЛ6.
4. Медные сплавы: ЛС59-1 Л; ЛК80-3Л; ЛАЖ60-11Л.

Основные требования к отливкам: равностенность и тонкостенность, отсутствие поднутрений, наличие литейных уклонов, плавные переходы при сопряжении стенок, стенки должны быть минимальной толщины.

Литниковые системы при литье под давлением

Чаще всего применяют два способа подвода металла к отливке: боковой (рис. 50) и прямой (рис. 51).

Особенности литья под давлением

1. Заполнение металлом полости формы. Заполнение идёт быстро 0,01 – 0,6 сек. при скорости до 50 м/сек. При быстром заполнении воздух, находящийся в полости формы, смешивается с металлом и образуется воздушно-металлическая эмульсия, которая затвердевает. Таким образом, главный дефект отливок, полученных давлением, – газовая пористость.

2. Гидравлический удар. При заполнении формы металл, движущийся с большой скоростью, мгновенно останавливается. Возникает гидравлический удар.

Полезность гидроудара – способствует четкому оформлению конфигурации отливки.

Вредное действие гидроудара – подвижная часть формы под действием гидроудара отходит от неподвижной. Поэтому отливки по разъёму пресс-формы имеют облой.

3. Затверждение отливки с большой скоростью. Отливки, полученные литьём под давлением, характеризуется низкой плотностью, невысокими механическими свойствами. Отливки нельзя термически обрабатывать, т.к. при нагреве поверхность вспучивается из-за расширения пузырьков газа.

Пути совершенствования способа литья под давлением:

- вакуумирование полости формы и тигля,
- применение толстых питателей с той целью, чтобы они затвердевали позднее отливки,
- заполнение полости формы кислородом после вытеснения воздуха перед заливкой. При этом кислород идёт на окисление расплава, исчезает источник образования газовой пористости (азот) (способ А.А. Рыжикова).

5.5.3 Центробежное литьё

Суть метода состоит в том, что жидкий металл заливается в быстро вращающуюся форму и под действием центробежных сил отбрасывается к её поверхности и затвердевает. Это способствует уплотнению и повышению прочностных свойств отливок, т.к. при этом газы и неметаллические включения центробежной силой отбрасываются к внутренней поверхности полый отливки.

Способы центробежного литья

1. Горизонтальная ось вращения формы:

а) наличие свободной цилиндрической формы поверхности (для производств трубных изделий) (рис. 55)

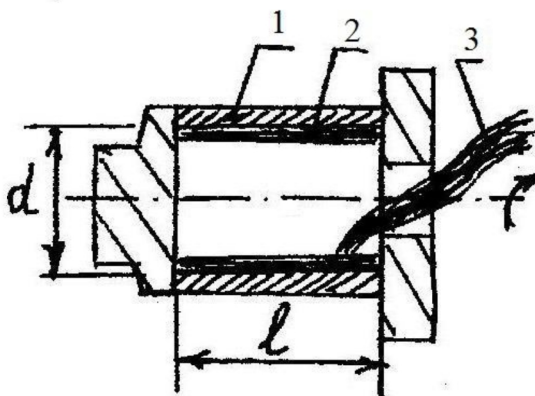


Рис. 55

б) отсутствие свободной поверхности (для повышения плотности отливок и заполняемости форм) (рис. 56)

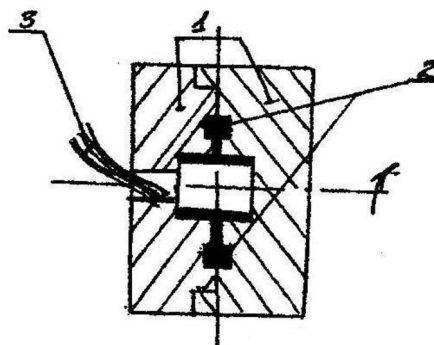


Рис. 56

2. Вертикальная ось вращения формы:

а) наличие свободной параболоидной формы поверхности (рис. 57)

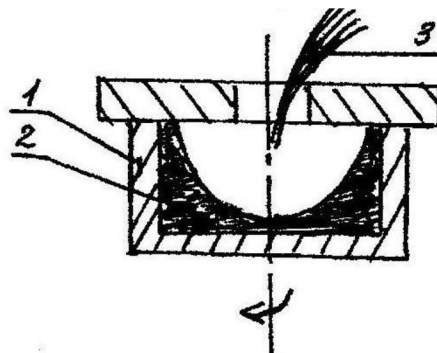


Рис. 57

б) отсутствие свободной поверхности (рис. 58)

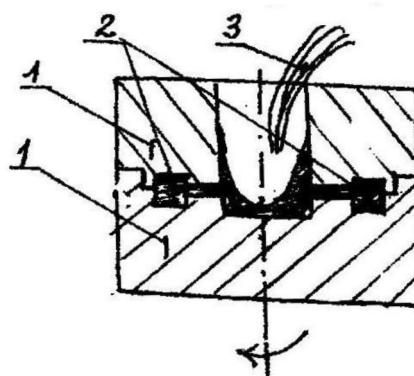


Рис. 58. 1 – формы (полуформы), 2 – изделие, 3 – расплав

На рис. 59 приведена схема машин для литья водопроводных труб.

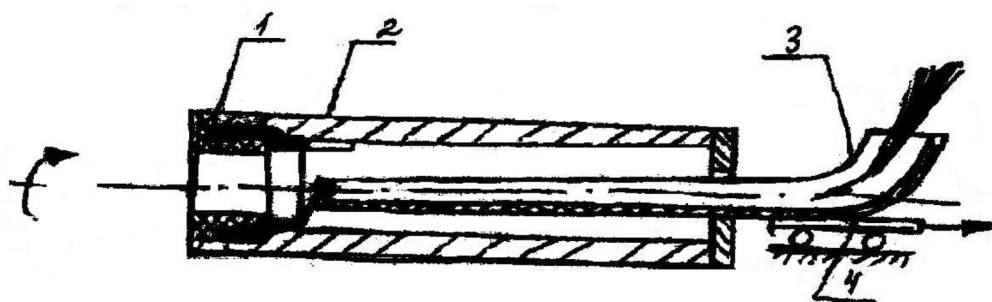


Рис. 59. Схема машин для центробежного литья труб: 1 – стержень, 2 – форма, 3 – желоб, 4 – тележка

Разновидностью метода центробежного литья является центрифугирование, при котором металлические или песчаные формы со стержнями остаются неподвижными в процессе заливки и приводятся во вращение при затвердевании металла.

Особенности центробежного литья

1. Отливка охлаждается с двух сторон: с наружной отдает тепло форме, со свободной поверхности охлаждается воздухом.

2. На частицу металла действует гравитационная ($P = m \cdot g$) и центробежная $Q = m \cdot \omega^2 \cdot r$ силы. Отношение $\frac{Q}{P} = K$ ($K = 30 - 50$ и до 100) называется гравитационным коэффициентом. K показывает во сколько раз тяжелее становится частица металла при его вращении. Утяжеление частиц способствует получению плотных отливок.

3. Газовые и неметаллические частицы выносятся на свободную поверхность. Таким образом, отливки получаются чистыми по неметаллическим и газовым включениям.

4. При вращении гетерогенной жидкости более тяжёлая фаза отбрасывается к периферии отливки, а лёгкая фаза – к свободной поверхности. Таким образом, может проявляться ликвация в очень сильной степени.

5.5.4 Литъё по выплавляемым моделям

Изготовление лопаток ГТД

Способ литъя получил промышленное развитие лишь в 40-х годах нашего столетия. Он применяется для получения сложных по конфигурации тонкостенных (до 0,3 мм) отливок с размерами повышенной точности (+0,125 мм на длине 25 мм) и высоким классом чистоты, требующих сложной и трудоёмкой механической обработки, а также для получения изделий из труднообрабатываемых сплавов. Такие детали обычно применяют в конструкциях и механизмах без предварительной механической обработки, за исключением сопрягаемых поверхностей. Этот способ применяют, например, для получения турбинных лопаток авиационно-ракетных двигателей. Особенности этого способа литъя: одноразовое использование моделей и керамических форм, отсутствие разъёмов в формах. Это исключает образование перекосов и заливов. При этом стоимость отливок, полученных этим подобным способом, значительно выше, чем при литъе в другие формы.

В промышленности применяются следующие разновидности способов получения точных отливок [7 – 10]:

а) по выплавляемым моделям, когда создается модель из легкоплавких компонентов (парафин, стеарин, канифоль, церезин и др.);

б) по выжигаемым моделям, когда модель из пенополистирола выжигается заливаемым металлом;

в) по растворяемым моделям, когда разовая модель растворяется специальными составами.

Метод литья по выплавляемым моделям включает в себя следующие циклы:

- приготовление модельной массы;
- изготовление моделей и модельных блоков;
- изготовление керамической оболочки;
- выплавка моделей из формы;
- прокалка оболочек;
- заливка формы жидким металлом;
- выбивка отливки из формы, обработка отливок.

На заводах авиационной промышленности применяют *метод литья по выплавляемым моделям с направленной кристаллизацией*. При направленной кристаллизации в отливке образуется 2 – 4 кристалла, направленных вдоль лопатки. Столбчатая структура позволяет повысить жаропрочность, пластичность, термостойкость и выносливость лопаток по сравнению с равноосной структурой. Методом литья по выплавляемым моделям можно получить лопатки со сложной внутренней полостью, с тонкими стенками. Высокая точность отливок и чистота их поверхности позволяют свести к минимуму механическую обработку (шлифование пера и обработка замка).

Технологический процесс литья охлаждаемых лопаток по методу направленной кристаллизации состоит из следующих основных этапов.

Изготовление керамических стержней

Стержни изготавливают запрессовкой стержневой массы в пресс-форму. В состав массы входят зернистый огнеупорный материал, связующий и пластификатор. В качестве зернистого материала применяют электрокорунд. В состав связующего входят двуокись титана (25%) и глинозём (75%). Пластификатор может состоять из парафина (90%) и полиэтилена (10%). Стержневая масса для лопаток I ступени турбореактивного двигателя состоит из 96% зернистого материала, 4% связующего и 15 – 16% пластификатора (свыше 100%). Нагретые до 130 – 170°C исходные материалы смешиваются. После охлаждения смеси нарезаются куски размерами 50x50x10 мм. Прессование керамических стержней производится на гидравлическом прессе. При этом подогретая до 90 – 130°C смесь запрессовывается в металлическую форму при давлении прессования 30 – 50 кг/см². После зачистки заусенцев стержни рихтуются в металлических драйерах. Для придания стержням механической прочности их обжигают в газовых печах при 1400°C в течение 10 – 12 часов. Обожженные стержни покрывают лаком КО-815 и сушат при комнатной температуре.

Изготовление моделей лопаток

Для изготовления моделей лопаток применяют различные модельные составы, например, карбамид (90%), селитра калиевая (10%). Смешивание этих материалов осуществляется при температуре 125 – 130°C. Изготовление моделей производится свободной заливкой модельного состава в подогретую до 50 – 55°C металлическую пресс-форму. Перед заливкой модельного состава в пресс-форму устанавливают керамический стержень.

Аналогичным способом изготавливают модели элементов литниковой системы. Несколько моделей лопаток (чаще 4) и модель литниковой системы собирают в блок путём припаивания моделей горячим ножом.

Изготовление керамических оболочковых форм и подготовка их под заливку

Огнеупорная суспензия керамических оболочек готовится на основе дистенсилиманита или электрокорунда. В гидролизированный этилсиликат

засыпается электрокорунд мелких фракций (№ 7 – 25%, № 3 – 40%, № 5 – 35%) и перемешивается, затем на модельные блоки наносится огнеупорная суспензия. Указанная операция производится путем окунания блоков в суспензию. Покрашенный модельный блок обсыпается электрокорундом в пескосыпе в жид-кокигопцем слое. Таким образом, наносится несколько слоев (8 – 10) керамического покрытия в зависимости от размеров лопаток. Причем первый слой обсыпается электрокорундом № 20 – 25, второй и последующий – № 40 – 50. После нанесения каждого слоя производится сушка вакуумно-аммиачным способом с естественной сушкой на воздухе в течение 1 – 1,5 часов. Удаление модельного состава из керамических оболочек производится в горячей воде (90С). После просушки оболочек при 150 – 180°С производится их прокалка при 950°С с выдержкой не менее 6 часов. После прокали и охлаждения формы готовят к заливке. В литниковый ход чаши вставляют стопор из никелевой фольги (3 шт. толщиной 0,2 мм). Керамическая оболочка устанавливается в графитовую опоку. Пространство между стенками опоки и оболочкой заполняется графитовой крошкой (0,5 – 5 мм) с применением вибрации. В литниковую чашу закладывается навеска шихты жаропрочного сплава ЖС6ФВИ для лопатки I ступени весом 2,4 кг. Литниковая чаша закрывается керамической крышкой, графитовая опока закрывается графитовой крышкой.

На рис. 60 показана форма, подготовленная для заливки.

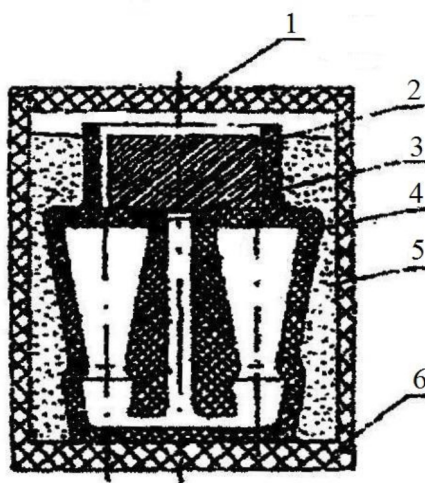


Рис. 60. Форма для литья лопаток: 1 – графитовая крышка, 2 – шихтовая заготовка, 3 – никелевая фольга, 4 – керамическая оболочка формы, 5 – графитовая засыпка, 6 – графитовая опока

Плавка, заливка и кристаллизация лопаток в печи ПМП-2

Принципиальная схема печи приведена на рис. 61.

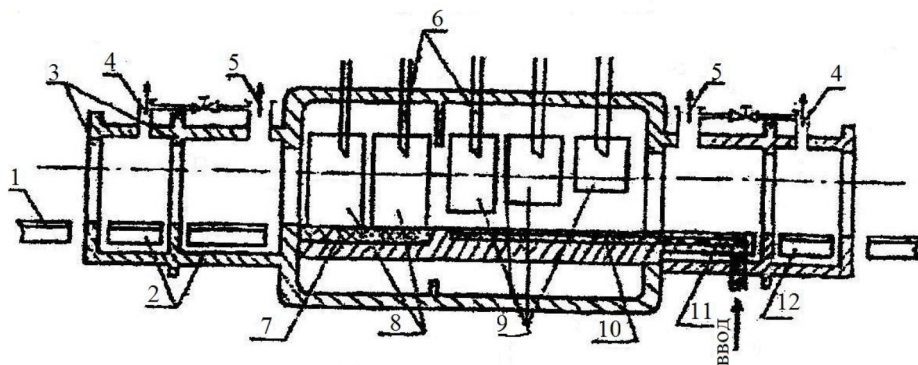


Рис. 61. Схема печи ПМП-2: 1 – стол для загрузки с механизмом проталкивания опок, 2 – столы форкамер, 3 – вакуумные затворы, 4 – патрубок создания вакуума механическими насосами, 5 – патрубок создания вакуума диффузионными насосами, 6 – термопары, 7 – стол с графитовым покрытием, 8 – нагреватели в зонах нагрева и плавления шихты, 9 – нагреватели зоны кристаллизации лопаток, 11 – водоохлаждаемый стол, 12 – камера для выгрузки опок

Технические характеристики печи ПМП-2

Мощность Р, кВт	530
Максимальная температура в зонах Т°С	
нагрева	1600
плавления	1700
кристаллизации	1500
Остаточное давление р, мм рт. ст.	0,001
Продолжительность выгрузки, мин.	5...20
Максимальные размеры формы, мм	150x200x500

На приемный стол печи подается 5 графитовых опок с формами. Все операции (нагрев, плавление, заливка форм, кристаллизация) проводятся автоматически. Цикл толкания опок составляет 12 мин. В печи имеется 9 зон с рабочими температурами, которые приведены ниже.

Рабочие температуры печи ПМП-2 по зонам

Зоны	Температура, °С
Нагрев	1300
	1420
	1520
Плавление	1560
	1560
	1600
Кристаллизация	1500
	1470
	1400

В зоне плавления происходит расплавление шихты, никелевой фольги и жидкий сплав заполняет форму. В зоне кристаллизации графитовые опоки попадают на расположенный внизу водоохлаждаемый кристаллизатор. При этом охлаждается нижняя часть отливки, а верхняя часть подогревается нагревателями печи. По мере продвижения отливки в зоне кристаллизации ее подогрев в зоне кристаллизации перемещается снизу вверх. В этом же направлении перемещается и фронт кристаллизации. В результате, в отливке образуются столбчатые кристаллы, расположенные вдоль лопатки.

Обрезка литников, удаление стержней, контроль отливок

После охлаждения лопаток производится разрушение керамической оболочки. Лопатки от литников отрезаются вулканитовым кругом. Контроль макроструктуры производится по эталонам после травления в реактиве хлорного железа и соляной кислоты (FeCl_3 – 600 мм, HCl – 100 мл на 1 литр воды, время травления – 60 мин). Кристаллы должны быть направлены параллельно оси лопатки, количество кристаллов – не более 4. Из лопаток удаляются стержни. Нагретые до 390 – 400°С лопатки в вертикальном положении загружают в расплав бифтористого калия (360 – 380°С,

выдерживают 50 – 70 мин). Затем лопатки промывают в воде (80 – 90°C), в водном растворе хлорокиси циркония, серной кислоты и уротропина (для снятия хлоридной плёнки) и снова в воде (70 – 80°C). Если керамика остается, то процесс повторяется. Контроль лопаток производится следующими методами:

- рентгеновским (просвечиванием) – 100%;
- люминесцентным – 100%;
- контролем геометрических размеров. На рис. 62 приведены схемы лопаток.

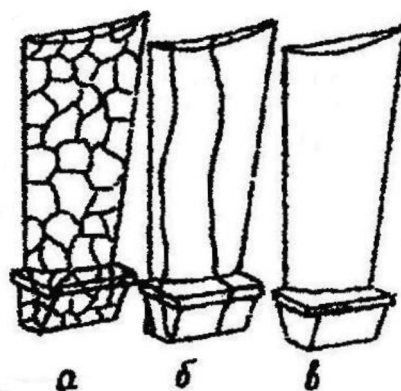


Рис. 62. Схема макроструктуры лопаток: а – равноосная, б – столбчатая, в – монокристаллическая

5.5.5 Литье в керамические формы по постоянным моделям

Керамическая форма – это разовая химически твердеющая форма, полученная из специальной жидкоподвижной смеси наливной формовкой с последующим прокаливанием. Керамические формы изготавливают по постоянным, выплавляемым, гипсовым моделям и др. Рассмотрим технологические основы литья в керамические формы по постоянным моделям.

Литьё в керамические формы разработано в 1951 году английскими учёными братьями Клиффордом и Ноэлем Шоу, и поэтому этот метод получил название «Шоу-процесс». В отечественной промышленности этот метод также называется Шоу-процессом или литьём в керамические формы. Позднее

появились различные варианты Шоу-процесса: Композайт-Шоу-процесс, Юникаст-процесс, Дин-процесс, Шотт-процесс, Керамкаст-процесс и др., а также отечественные варианты, не имеющие специальных названий (способы М.В. Сладковой, И.Д. Абрамсона, Ф.Д. Оболенцева и др.).

Литье в керамические формы применяют в единичном, средне- и мелкосерийном производстве отливок практически из любых цветных и чёрных металлов. Особенности Шоу-процесса позволяют получать, как правило, крупногабаритные детали больших масс. Большинство их размеров выполняются в одной полуформе, что приводит к повышенной точности отливок. Таким образом, метод литья в керамические формы нашёл наиболее широкое применение при производстве деталей:

- металлооснастки (штампы, пуансоны, пресс-формы, модельные плиты, элементы кокилей, стержневой и модельной оснастки);
- турбин из жаро- и коррозионностойких сталей и сплавов.

Основа процесса – изготовление специальной жидкоподвижной керамической формовочной смеси. Эта смесь состоит из порошкообразного огнеупора, связующего и коагулятора. В качестве огнеупора применяют, как правило, смесь кварцевого песка и маршаллита, связующим служит гидролизированный этилсиликат. Роль коагулятора выполняет 15%-й раствор NaOH.

Технологический процесс заключается в следующем (рис. 63). Огнеупорные материалы (кварцевый песок и пылевидный кварц-маршаллит) подготавливаются и засыпаются в барабан, где тщательно перемешиваются (рис. 55, а). В гидролизёре готовится этилсиликат. Гидролизированный этилсиликат подаётся в специальный бачок, добавляется водный раствор NaOH и при перемешивании засыпается смесь песка и маршаллита (рис. 63, б). Приготовленная таким образом смесь выливается на модель, установленную в опоке на плите (рис. 63, в). Через некоторое время смесь начинает затвердевать, после чего модель извлекают. Полуформу устанавливают на плиту и сразу поджигают спирт (рис. 63, г). Таким же образом получают

вторую полуформу. После прокалки полуформы собирают, и форма готова для заливки металла (рис. 63, д).

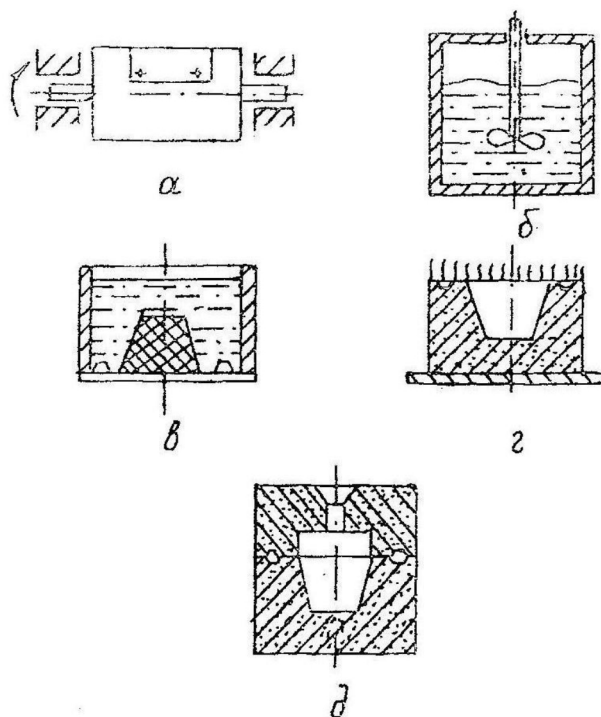


Рис. 63. Схема процесса изготовления керамической формы

Технология литья в керамические формы содержит элементы литья в песчаные формы: наличие разъёма в формах, применение модельно-опочной оснастки и др. Принципиальное же отличие способа заключается в применении специальной формовочной смеси. Это позволяет получать четкий и точный отпечаток модели. При выгорании спирта и прокаливании на поверхности полости возникают мелкие трещины. Они существенно улучшают газопроницаемость формы без ухудшения чистоты поверхности отливок.

К модельной оснастке относятся модели, модельные плиты и опоки. Модели изготавливают из различных материалов: дерево, гипс, пластмасса. Выбор материала определяется серийностью производства и точностью отливок. Применение полированных металлических моделей обеспечивает максимальную точность. Деревянные модели (орех, бук и др.) используются при небольших сериях производства несложных отливок. Деревянные модели

покрывают лаком, устойчивым против спирта или ацетона в зависимости от материала связующего. Модели также могут покрываться слоем парафина. Металлическая модель, как правило, обрабатывается защитным покрытием, но при применении формовочной смеси модель покрывается тонким слоем вазелина или смесью вазелина с трансформаторным маслом. Иногда в качестве модели применяют готовое изделие.

При заливке формовочных смесей модели отливок и литниковой системы могут всплывать. Поэтому они крепятся к модельной плите. Кроме того, модельные плиты снабжаются элементами для оформления фиксаторов на полуформах. Фиксаторы исключают возможность сдвига по разьему верхней и нижней полуформ. Ниже рассмотрены технологические особенности изучаемого процесса.

Приготовление формовочной смеси

Исходными компонентами при гидролизе этилсиликата являются: 1000 объёмных частей этилсиликата, 160 частей спирта, 120 частей воды, 5,5 частей концентрированной соляной кислоты.

В качестве огнеупорной составляющей применяют смесь кварцевого песка и маршаллита в соотношении 1:3. Предварительно песок и маршаллит прокаливают при температуре около 900 – 950°C в течение 3 – 4 часов, просеивают соответственно через сита 03 и 005 и тщательно перемешивают.

Роль коагулятора играет 15%-й раствор NaOH. Коагулятор ускоряет процесс огеливания гидролизованного этилсиликата. Формовочная смесь готовится следующим способом. В ёмкость заливают 100 объёмных частей гидролизованного этилсиликата, затем – 5 частей коагулятора и раствор перемешивают. Затем вводится 300 весовых частей огнеупорной смеси. Смесь перемешивается и доводится до консистенции густой сметаны. Жидкая смесь некоторое время выдерживается в смесителе для удаления пузырьков воздуха и выпивается на модельную плиту. Когда смесь приобретает резинообразное состояние, модель извлекается. После извлечения модели форма сразу же поджигается для удаления спирта и воды.

Обжиг и прокаливание форм

Одним из факторов, определяющих качество отливок, является газопроницаемость керамической формы. Процесс гидролиза этилсиликата сопровождается интенсивным выделением спирта. При поджигании спирт сгорает. Это вызывает растрескивание поверхности формы. Появляется сетка мелких трещин. Эта структура керамической формы обладает высокой газопроницаемостью и хорошей податливостью. При этом также компенсируется тепловое расширение формы при заливке жидкого металла. Но иногда при обжиге и прокаливании трещины развиваются сильнее, что сказывается на механической прочности формы.

После сгорания спирта формы обжигают. Обжиг проводят газовыми горелками. При этом пламя направляют в глубокие части формы. Режим обжига и прокаливания определяется размерами форм. Формы малых размеров с толщиной стенок более 4 мм после обжига горелкой собираются и подаются на заливку. Формы для отливок с толщиной стенок менее 4 мм прокаливаются при 900°C в течение 3 часов и подаются на заливку.

Формы средних размеров обжигают при 350°C в течение 3 часов. Если форма предназначена для получения отливок с толщиной стенок менее 4 мм, то её прокаливают при температуре 900°C.

Формы больших размеров прокаливают при температуре 900°C в течение 5 часов.

Заливка, выбивка и очистка отливок

Сборка керамических форм принципиально не отличается от сборки песчаных форм. При горизонтальном разъёме полуформы фиксируются грузом, который устанавливается сверху, а при вертикальном разъёме – с помощью струбцин. При этом допускается замазывание швов керамической смесью (до прокаливания).

Собранную форму заливают металлом, как и песчаную. После охлаждения форму разбивают для извлечения отливки. Для удаления керамической массы из отливок сложной формы применяют растворение в

ваннах с расплавленной каустической содой. Измельчённую керамическую массу используют повторно. Удаление литников и очистка отливок производится обычными способами.

6. ОТДЕЛКА И КОНТРОЛЬ ОТЛИВОК

Заливка форм производится в горизонтальном, вертикальном или наклонном положениях форм. Формы заливают на конвейерах, рольгангах или специальных площадках. Заливают металл из ручных или крановых ковшей. При этом используют разливочные ковши следующих типов (рис. 64): барабанные (а), чайниковые (б) и ковши со стопором (в) [7 – 10].

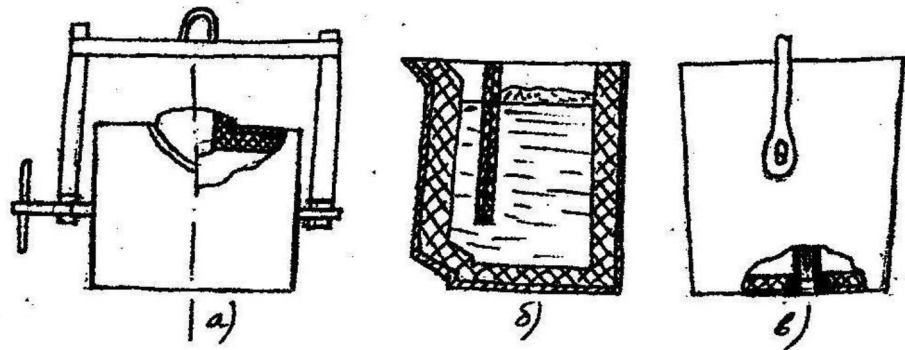


Рис. 64. Разливочные ковши: а – барабанный, б – чайниковый, в – со стопором

Охлаждение отливок

Длительность охлаждения отливок зависит от теплофизических свойств металла и формовочной смеси, формы и массы отливки и других факторов.

Общая продолжительность охлаждения отливок может быть найдена из соотношения:

$$\tau = \frac{\pi R^2}{4b_{\phi}} \left[c_1^2 \gamma_1^2 \left(\ln \frac{V_{\text{заг}}}{V_{\text{лик}}} \right)^2 + \left(c_2 + \frac{\rho}{\Delta} \right)^2 \gamma^2 \left(\ln \frac{V_{\text{лик}}}{V_{\text{сол}}} \right)^2 + c_3 \gamma_3 \left(\ln \frac{V_{\text{сол}}}{V_{\text{выб}}} \right)^2 \right],$$

где R – приведенная толщина отливки, м;

c_1, c_2, c_3 – теплоемкости жидкого, кристаллизующегося и твердого сплава, $\frac{\text{ккал}}{\text{град}}$;

$$\frac{\kappa\Gamma}{M^3};$$

$$V_{\text{лик}} = t_{\text{лик}} - t_{\text{нач.ф.}};$$

$$V_{\text{сол}} = t_{\text{сол}} - t_{\text{нач.ф.}};$$

$$V_{\text{выб}} = t_{\text{выб}} - t_{\text{нач.ф.}};$$

где ρ – скрытая теплота плавления, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$;

$$b_{\phi} - \text{коэффициент аккумуляции теплоты формой, } \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час}^2 \text{град}}.$$

Опыт работы литейных цехов показывает, что отливки можно извлекать из форм при следующих температурах:

- ### ***Выбивка отливок и удаление стержней***

Стержни удаляют с помощью пневматических зубил (мелкие отливки) или на стационарных пневматических вибрационных машинах (сложные отливки). Выбивку стержней из крупных стальных и чугунных отливок производят в гидравлических камерах. В этом случае на отливку направляют

струю воды ($\varnothing 5 - 20$ мм) под давлением 50 – 100 атм. При этом наряду с удалением стержня осуществляется и очистка поверхности отливок.

Обрубка, зачистка и очистка отливок

Обрубка – грубая обработка. Она применяется с целью отделения от отливки литников, прибылей, выпоров, облоев и т.д. Обрубка осуществляется вручную с помощью пневматических зубил (чугун), ленточных и дисковых пил (алюминий, магний, медь), прессов, газовой резки (сталь).

Зачистку осуществляют с помощью шлифовальных кругов (корундовых или карборундовых). При зачистке электроконтактным способом заусенцы и заливы оплавляются при контакте отливки со стальным диском. Диск вращается со скоростью ~ 40 м/сек. К отливке и диску подводится электрический ток. С целью удаления остатков литников, прибылей и мелких заливок отливки подвергают зачистке. При зачистке газопламенными горелками заусенцы и заливы оплавляются.

Для удаления приготовленной смеси и улучшений поверхности отливки после обрубки и зачистки подвергают очистке галтовкой, песком, дробью, химической или электрохимической обработкой.

Очистка галтовкой осуществляется в барабанах. При этом способе отливки загружаются в барабан. Во время вращения барабана отливки трутся, переворачиваются. Таким образом, удаляется пригоревшая смесь. Для ускорения процесса очистки в барабан загружают звёздочки из белого чугуна.

При гидropескоструйной или дробеструйной обработке на поверхность отливок под давлением воздуха или воды подаётся песок или дробь.

Для удаления пригоревшей формовочной смеси на внутренних труднодоступных поверхностях отливок применяют более дорогую химическую или электрохимическую обработку.

Обработка отливок

Анодномеханическая

Основана на одновременном растворении (анодном) металла изделия и механическом удалении продуктов растворения.

Анодногидравлическая (электроэрозионная)

Основана на тепловом воздействии электрического тока между электродом (инструментом) и обрабатываемым изделием.

Электроискровая – разновидность электроэрозионной обработки, основанной на том, что на поверхности заготовки, находящейся в диэлектрической жидкости (например, в керосине), происходят короткие искровые разряды, приводящие к плавлению, испарению и выбросу частиц поверхности заготовки. При этом инструмент имеет форму, являющуюся зеркальным отображением заданной поверхности (формы, кокиля и т.п.)

Электрогидравлическая (ЭГУ – электрогидравлическая установка) применяется для удаления стержней из отливок. Основана на электрическом разряде между отливкой и электродом, происходящим в ёмкости с водой.

Исправление дефектов отливки

Многие отливки имеют дефекты, которые можно исправить. При этом применяют следующие способы исправления дефектов.

Правка применяется для устранения коробления отливок. Правку осуществляют с помощью механических или гидравлических прессов и ударов молота. Контроль после правки ведут шаблонами и линейками.

Заварка дефектов осуществляется жидким металлом или сваркой. Предварительно дефектное место отливки подготавливают: удаляют часть отливки и придают полости определённые формы. При заварке жидким металлом отливку засыпают формовочной смесью, оставляя открытым дефект. На эту часть отливки подают струю жидкого металла. При этом дефектное место оплавляется и при охлаждении кристаллизуется вместе с металлом заварки.

Широкое применение получила дуговая или газовая заварка. Перед заваркой отливку обычно нагревают во избежание появления термических напряжений. Заварку ведут сплавом, не отличающимся по составу от состава сплава отливки. Если стальная отливка обработана и сварка может вызвать искажение её размеров, дефекты устраняют пайкой.

Пропитка применяется для исправления пористых отливок. При этом способе поры и пустые отливки заполняют твердеющими материалами (бакелит, полистирол, жидкое стекло, этилсиликат и др.). Операцию проводят в специальных баках при температуре 150 – 200°С под давлением 5 – 6 атм.

Контроль качества отливок

Отливки проходят как промежуточный, так и окончательный контроль. При этом контролируют геометрические размеры, механические свойства, отсутствие внешних и внутренних дефектов. Контроль может быть массовым или выборочным.

Контроль геометрических размеров проводят на разметочных столах с помощью скоб, кондукторов и др. Для контроля размеров внутренних полостей отливок последние периодически разрезают.

Механические свойства (σ_b , $\delta\%$, КСЧ, ψ , твёрдость) определяют на отдельно изготовленных или прилитых образцах (трефах). В отдельных случаях образцы вырезают из отливки.

Для выявления внутренних дефектов используют методы рентгеноскопии, γ -дефектоскопии и ультразвуковой дефектоскопии.

Если отливки работают в условиях наивысшего давления газа или жидкости, то они испытываются при рабочих давлениях (и выше) жидкости или газа.

7. НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЕТАЛЛУРГИИ, МЕТАЛЛООБРАБОТКЕ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИ [11 – 19]

В последнее время в промышленно развитых странах, в том числе и в России, сформировалась новое научно-техническое направление «Наночастицы, наноматериалы, нанотехнологии и наноустройства». Для России это наукоёмкое направление определяется рядом научно-технических программ различных министерств, Российской академии наук, а также специально созданной корпорацией «Роснано». Но что же означает слово «нано», и, как применение нанотехнологии сказывается на таких обширных отраслях науки и техники, как металлургия и металлообработка.

Прежде всего, нанотехнология есть совокупность процессов, позволяющих создавать материалы, устройства и технические системы, функционирование которых определяется наноструктурой, т.е. её упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм. На таких микро масштабах происходят взаимодействия, которые в конечном итоге определяют макроустройства объекта, что дает возможность создать данный макрообъект. Конструируя его из самых элементарных составляющих (атомов и молекул), располагая их в нужных местах, специалисты могут создавать материалы с новыми свойствами. Для металлургии же использование всевозможных наноустройств позволяет получать более чистые компоненты для дальнейшего производства сплавов и извлекать необходимые элементы из бедных руд с минимальными затратами (последнее становится особенно актуальным, ведь с каждым днём добывать металлы из руд становится всё сложнее из-за истощения богатых месторождений).

Сейчас вопрос развития нанонауки для каждой страны считается весьма важным, ведь это область науки и техники является очень перспективной и многообещающей. То, насколько развиты нанотехнологии в стране, отражает уровень развития государства в целом. Именно поэтому правительства многих

стран в последнее время уделяют особое внимание этому вектору исследований.

История развития нанонауки

Появление такой области знаний, как нанонаука, не является следствием какого-либо одного открытия, поскольку данная область знаний слишком обширна и человечество приходило к необходимости создания nanoиндустрии, как отдельной ветви науки и промышленности, не одно десятилетие. Ниже приведены основные разработки, открытия, давшие начало исследованиям в микромире и применению нанотехнологии.

1905 год – швейцарский физик Альберт Эйнштейн опубликовал работу, в которой доказывал, что размер молекулы сахара составляет примерно 1 нанометр.

1931 год – немецкие физики Макс Кнолл и Эрнст Руска создали электронный микроскоп, который впервые позволил исследовать nanoобъекты.

1968 год – Альфред Чо и Джон Артур, сотрудники научного подразделения американской компании Bell, разработали теоретические основы нанотех-нологии при обработке поверхностей.

1974 год – японский физик Норио Танигучи на международной конференции по промышленному производству в Токио ввел в научный оборот слово «нанотехнологии». Танигучи использовал это слово для описания сверхтонкой обработки материалов с нанометровой точностью. При этом была рассмотрена не только механическая, но и ультразвуковая обработка, а также пучки различного рода (электронные, ионные и т.п.).

1982 год – германские физики Герд Бинниг и Генрих Рорер создали социальный микроскоп для изучения объектов наномира. Ему дали обозначение СЗМ (сканирующий зондовый микроскоп). Это открытие имело огромное значение для развития нанотехнологии, так как это был первый микроскоп, способный показывать отдельные атомы.

1985 год – американские физики Роберт Керл, Хэрольд Крото и Ричард Смайли создали технологию, позволяющую точно измерять предметы диаметром в один нанометр.

1999 год – американские физики Джеймс Тур и Марк Рид определили, что отдельная молекула способна вести себя так же, как молекулярные цепочки [11].

На этом перечень открытий, сделанных для развития наноиндустрии, не может быть завершен, поскольку нанонаука все глубже проникает в тайны вещества, в тайны атомов и молекул в область, очень мало исследованную человеком.

Нанотехнологии в металлообработке и материаловедении

Известно, что механические свойства кристаллических материалов, полученные в результате расчёта свойств идеальной решетки (теоретические свойства), во много раз превышают значения, достижимые на практике. Причиной этого является то, что реальная кристаллическая решетка имеет дефекты, очень сильно изменяющие её параметры. Ученых всего мира давно волнует проблема получения идеальной кристаллической решетки в реальном объекте для улучшения его качеств (к примеру, увеличение прочности металлов, ведь традиционные пути увеличения прочности, основанные на создании дефектов кристаллической решетки, себя практически полностью исчерпали). Именно эти горизонты в деле получения новых веществ с уникальными свойствами и открывает для материаловедов нанотехнология. Однако на сегодняшний день не существует технологии, позволяющей получить металлическое изделие с идеальной кристаллической решеткой для коммерческого применения. Поэтому сейчас нанотехнологии для получения конкретного изделия с высокими свойствами используют по другому пути. Хорошо известны, например, такие соотношения: $T_m \sim 1/L$ и $\sigma, HV \sim 1/L^2$, где T_m , σ , HV – температура плавления, прочность и твердость соответственно; L – размер фазовой составляющей или зерна [12].

Из соотношений видно, что свойства материала растут с уменьшением L . Именно этот факт и используется сейчас при производстве нанометаллов с высокими механическими характеристиками. Методом интенсивной пластической деформации или методами порошковой металлургии в материале получают составляющие размером порядка 20 – 80 нм. Однако сейчас более перспективным является создание композиционных материалов с нитями из углеродных нанотрубок или с графеновыми слоями, впаянными в основу из обычного металла.

На сегодняшний день в области технологии материалов сделаны следующие открытия и ведутся следующие разработки.

В Томском государственном университете России разработаны составы и технология получения новых тонкопленочных наноструктурных материалов на основе двойных оксидов циркония и германия, имеющих высокую химическую, термическую стойкость и обладающих хорошей адгезией к различным подложкам (кремния, стекла, поликора и др.). Толщина пленок составляет от 60 до 90 нм, размеры включений 20 – 50 нм. Полученные там материалы могут быть использованы как покрытия для:

- стекол (солнцезащитные — хорошо пропускает видимый свет и отражает до 45 – 60% тепловое излучение, теплозащитные – отражает до 40% солнечной радиации, селективно пропускающие);
- ламп (увеличение световой отдачи на 20 – 30%);
- инструментов (защитно-упрочняющие – увеличение срока службы изделий).

Ведутся работы и в Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина. Направления исследований: поверхностные явления, фазовые превращения и структура конденсирования пленок. Исследования проводятся над пленками металлов и сплавов (1,5 – 100 нм), получаемых методом конденсации в вакууме на различных подложках путем электронной микроскопии (СМЗ), электронографии, а также методов, разработанных в группе (Гладких Н.Т., Крыштель А.П., Богатыренко С.И.)

В США создан нанометалл, который невозможно намочить. В лабораториях корпорации General Electric создан металл, который невозможно намочить, поскольку он обладает водоотталкивающими свойствами. Как пишет Washington ProFile, это открывает новые возможности для создания машин и механизмов, предназначенных для работы в сырости и снегу.

О том, каким образом удалось создать металл, обладающий столь ценными свойствами, на сегодняшний день известно крайне немного. Представители компании лишь сообщили, что для этого было использовано покрытие металла особыми нанокристаллами.

В Иране создано покрытие из нанокристаллов. Иранским исследователям удалось покрыть поверхность титана нанокристаллами, используя технологию плазменного электролитического борирования. По данным научного журнала Journal of Materials Science, степень сопротивления закаленного титана коррозии и эрозии напрямую зависит от размера, формы и распределения на поверхности нанокристаллов, из которых состоит его покрытие.

Как сообщил возглавляющий исследование ученый Махмуд Алоф Хазраи, в процессе нанесения на поверхность металла покрытия с помощью технологии борирования инженеры сталкиваются с различными факторами, правильный учет которых помогает достигнуть оптимального уровня коррозии и эрозии. Основными отраслями, в которых будет использоваться разработка иранцев, станут нефтегазовая и топливная промышленность, автопромышленность.

В Мичиганском университете разработан наноматериал, способный стать конкурентом металла. Наноккомпозит оксида алюминия и полимера оказался прочен, как металл, но при этом значительно легче. Ученые включили крошечные пластинки оксида алюминия в полимер для получения легкого, эластичного и прочного материала. Результатом его применения могут стать долговечные протезы костей и зубов, легкие, почти не

изнашивающиеся детали автомобилей и самолетов, эластичные и прозрачные печатные платы и электронные элементы [19].

Китайцы сделали сверхгибкое металлическое стекло. Изобретение стекла, которое может гнуться, уже само по себе кажется чем-то необычным. А вот гнущееся стекло, которое сделали специалисты из института физики Китайской академии наук (Institute of Physics) под руководством профессора Вэй Хуа Ванна (Wei Hua Wang), к тому же представляет собой металлический сплав [20].

Нанотехнологии в металлургии

Сейчас внедрение нанотехнологии в металлургию направлено на обогащение руд для их применения в процессах получения металлов, причем руды, обогащаемые сейчас методами нанотехнологий, ещё два десятка лет назад считались непригодными для применения.

Одним из перспективных способов, позволяющих организовать рентабельную переработку бедных руд, является ультратонкое измельчение продуктов до крупности менее 1 – 10 мкм. При измельчении до таких размеров значительная доля материала переходит в область микро- и наночастиц. Это приводит к изменению свойств сырья, и появляется возможность эффективного извлечения ценных металлов.

Долгое время сдерживающим фактором для развития микро- и нанотехнологий в обогащении и металлургии являлось отсутствие надежного оборудования для ультратонкого измельчения. Это связано с тем, что классические способы измельчения в горизонтальных и вертикальных шаровых мельницах подошли к своему естественному и технологическому барьеру, когда размер измельчаемых частиц уменьшается незначительно, зато экономические затраты возрастают экспоненциально.

В настоящее время промышленное оборудование для ультратонкого измельчения выпускается на нескольких крупных заводах (бисерные мельницы) и уже положительно зарекомендовало себя на рынке различных технологий. Одной из наиболее эффективных конструкций бисерных мельниц

является вертикальная мельница Deswik (производительность до 100 т/ч, объем до 5 м³). Данный тип мельниц потребляет в два раза меньше энергии, чем ее аналоги, при этом удельная производительность значительно выше.

Принцип действия бисерных мельниц достаточно прост (рис. 65). На измельчение поступает пульпа с содержанием твердого 40 – 60%. Вертикально расположенный импеллер, состоящий из дисков запатентованной формы, приводится в движение гидравлическим приводом и вращается с высокой скоростью (до 14 м/с). Соответственно, в движение вовлекается пульпа и измельчающая среда. В процессе интенсивного перемешивания происходит измельчение исходного материала. Измельчающей средой являются износостойкие шары (бисер) диаметром 1 – 3 мм и удельным весом 6,25 г/см³, изготовленные из материала на основе поликристаллов диоксида циркония. Шаровая загрузка вертикальных мельниц Deswik составляет 65 – 85%. В сравнении с классическими шаровыми мельницами, где используются металлические шары диаметром 40 – 60 мм, площадь измельчающих тел в единице объема бисерных мельниц в 20 – 30 раз выше, количество шаров (бисера) в одной тонне больше в десятки тысяч раз.

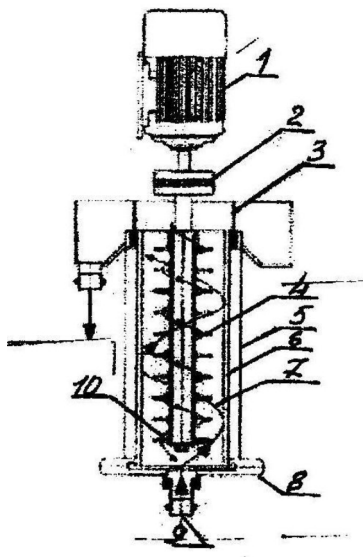


Рис. 65. Бисерная вертикальная мельница Deswik: 1 – двигатель, 2 – муфта, 3 – грохот, 4 – импеллер, 5 – корпус, футеровка, 6 – продукт, бисер, 7 –

съемный фланец, 8 – исходное питание, 9 – возврат бисера, 10 – измельченный продукт

Все вышеперечисленные условия (высокая скорость вращения, специальная конструкция импеллера, увеличение площади и количества измельчающих тел, высокие удельный вес бисера и загрузка шарами) обеспечивают быстрое ультратонкое измельчение исходного материала в открытом цикле. Износостойкие материалы, применяемые при изготовлении импеллера мельницы Deswik (полиуретан) и измельчающей среды (ZrO_2), позволяют минимизировать эксплуатационные затраты. Затраты энергии зависят от свойств исходного питания, необходимой крупности помола и составляют от 3 до 40 кВт/т.

Исследования различных типов упорного минерального сырья (более 20), выполненные в Центре Научных Исследований и Технологий института ГОМС в период с 2006 по 2008 годы, показали перспективность технологии ультратонкого измельчения концентратов и руд. Так, например, значительно повышается эффективность перемешивающих операций флотации для вкрапленных полиметаллических руд, повышается уровень извлечения золота при цианировании упорных сульфидных концентратов, расширяется область применения центробежных методов обогащения, значительно снижается энергопотребление при классическом измельчении руд до 40 – 74 мкм.

Таким образом, переход минерального сырья на уровень микрометров и нанометров расширяет области эффективного применения процессов обогащения и гидрометаллургии. Это позволяет вовлечь в эксплуатацию труднообогатимые руды, переработка которых ранее считалась малоперспективной и экономически нецелесообразной. Новые свойства такого «микро и наносырья» позволяют повысить уровень извлечения ценных металлов. Комбинированные гидрометаллургические технологии с применением ультратонкого измельчения в определенных случаях являются

более рентабельной альтернативой традиционным окислительным процессам (обжиг, автоклавное и бактериальное окисление) [20].

Количество коммерческих изделий, в которых использованы технологии наноиндустрии, пока можно пересчитать на пальцах рук, а для большинства людей сейчас нанотехнология столь же понятна и близка, как атомная энергия для человека, живущего в тридцатых годах XX века. Однако это малопонятная для широкого круга людей нанотехнология стремиться всё сильнее вторгнуться во все стороны нашей жизни, а страны сейчас соперничают друг с другом за лидерство в нанонауке. С каждым днем становится все более очевидно, что грядет новая научно-техническая революция, которая повлияет на жизнь человечества намного сильнее, чем предыдущая. И остается верить, что эта НТР даст возможность создать новые, более прочные, более надежные материалы, которые помогут экономить энергию, облегчить жизнь человека; и что будут разработаны новые методы добычи сырья, извлечения из руд, которые помогут более экономно использовать ресурсы, беречь энергию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Общая металлургия / Е.В. Челищев [и др.]. - М.: Металлургия, 1971. – 480 с.
2. Севрюков, Н.Н. Общая металлургия / Н.Н. Севрюков, Б.А. Кузьмин, Е.В. Челищев. – М.: Металлургия, 1976. – 586 с.
3. Заббаров, Р. Основы плавки и литья металлов: учеб. пособие / Р. Заббаров. – Самара: Изд-во СГАУ, 2006. – 170 с.
4. Заббаров, Р. Материалы и технологические процессы изготовления заготовок и отливок аэрокосмического назначения: учеб. пособие / Р. Заббаров. – Самара: Изд-во СГАУ, 2008. – 92 с.
5. Порошковая металлургия и напыленные покрытия / В.Н. Анциферов [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
6. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: учеб. для вузов / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.
7. Курдюмов, А.В. Производство отливок из сплавов цветных металлов / Л.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин. – М.: Металлургия, 1986. – 416 с.
8. Захаров, А.М. Промышленные сплавы цветных металлов / А.М. Захаров. – М.: Металлургия, 1980. – 256 с.
9. Курдюмов, А.В. Литейное производство цветных и редких металлов / Л.В. Курдюмов, М.В. Пикунов, В.М. Чурсин. – М.: Металлургия, 1982. – 351 с.
10. Производство фасонных отливок из титановых сплавов / Е.Л. Бибииков [и др.]. – М.: Металлургия, 1983. – 296 с.
11. Материалы Интернет-энциклопедии Wikipedia (<http://wikipedia.org/>).
12. Материалы новостного сайта Науки и разработки-R&D.CNews (<http://rnd.cnews.ru/>).
13. Материалы с сайта о нанотехнологиях №1 в России Nanonewsnet (<http://nanonewsnet.ru/>).
14. Публикации нанотехнологического общества «Нанометр» (<http://www.nanometr.ru/>).

15. Структура и свойства нанокристаллических материалов: сб. научных трудов. – Екатеринбург, 1999.
16. Кабаченко, Л.А. Тонкопленочные неорганические материалы / Л.А. Кабаченко // Материалы Воронежской конференции по нанотехнологиям (14 - 20 октября 2007 г.). – Воронеж, 2007.
17. Гладких, Н.Т. Особенности структурного состояния и диффузионной активности малых частиц / Н.Т. Гладких, АЛ. Крыштель, СИ. Богатыренко // Материалы Воронежской конференции по нанотехнологиям (14 – 20 октября 2007 г.). – Воронеж, 2007.
18. Материалы с новостного сайта <http://НАКАНУНЕ.RU/>.
19. Материалы с сайта <http://nanodigest.ru/>.