

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Н.И. Фомин, К.Г. Герасимович,
Ю.А. Евтюшкин, И.А. Хворова**

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Часть I

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Третье издание, исправленное и дополненное

Издательство
Томского политехнического университета
2010

УДК 620.18:669
ББК 34.62
Ф00

Фомин Н.И.

Ф00

Технологические процессы машиностроительного производства: учебное пособие / Н.И. Фомин, К.Г. Герасимович, Ю.А. Евтюшкин, И.А. Хворова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 101 с.

Учебное пособие включает две части. В первой части рассматриваются основы металлургического производства, литейного производства и обработки металлов давлением. Вторая часть посвящается обработке металлов резанием и сварочному производству.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по машиностроительным специальностям направлений 150900 «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» и 150400 «Технологические машины и оборудование».

**УДК 620.18:669
ББК 34.62**

Рецензенты

Доктор химических наук, профессор ТГАСУ
Б.П. Романов

Главный инженер ЗАО «Томский инструмент»
П.С. Симонов

© ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», 2011

© Фомин Н.И., Герасимович К.Г., Евтюшкин Ю.А., Хворова И.А., 2011

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Для успешного решения многих производственных вопросов необходимо иметь сведения о современных прогрессивных способах получения и обработки металлов.

Создавая машины и приборы в любой отрасли производства (машиностроении, автомобилестроении, самолетостроении, судостроении, сельхозтехнике, производстве электромоторов, приборостроении, химическом машиностроении и др.), а также занимаясь эксплуатацией этих машин, инженер должен обеспечить определенные их характеристики в соответствии с требованиями условий эксплуатации и надежность работы. Для этого надо учитывать особенности технологических методов обработки и сборки и экономическую целесообразность изготовления изделий тем или иным способом. Следовательно, необходимо хорошо знать основы технологических процессов.

В курсе «Технологические процессы машиностроительного производства» рассматриваются современные способы получения чёрных и цветных металлов, наиболее прогрессивные методы формообразования заготовок и деталей машин литьём, обработкой давлением, сваркой, обработкой резанием и другими видами обработки.

Изучение данного курса способствует успешному усвоению специальных дисциплин, формирующих технический кругозор современного специалиста.

1. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Металлургия – это область науки и техники и отрасль промышленности, охватывающая процессы получения металлов и сплавов из руд и других материалов, изменения их химического состава, структуры и свойств, придания им определённой геометрической формы. Чёрная металлургия производит сплавы на основе железа, цветная – на основе других металлов.

1.1. Структура металлургического производства

Металлургическое производство представляет собой сложный комплекс различных производств, базирующихся на месторождениях руд, коксующихся углей и энергетических мощностей. В этот комплекс входят следующие подразделения (рис. 1.1):

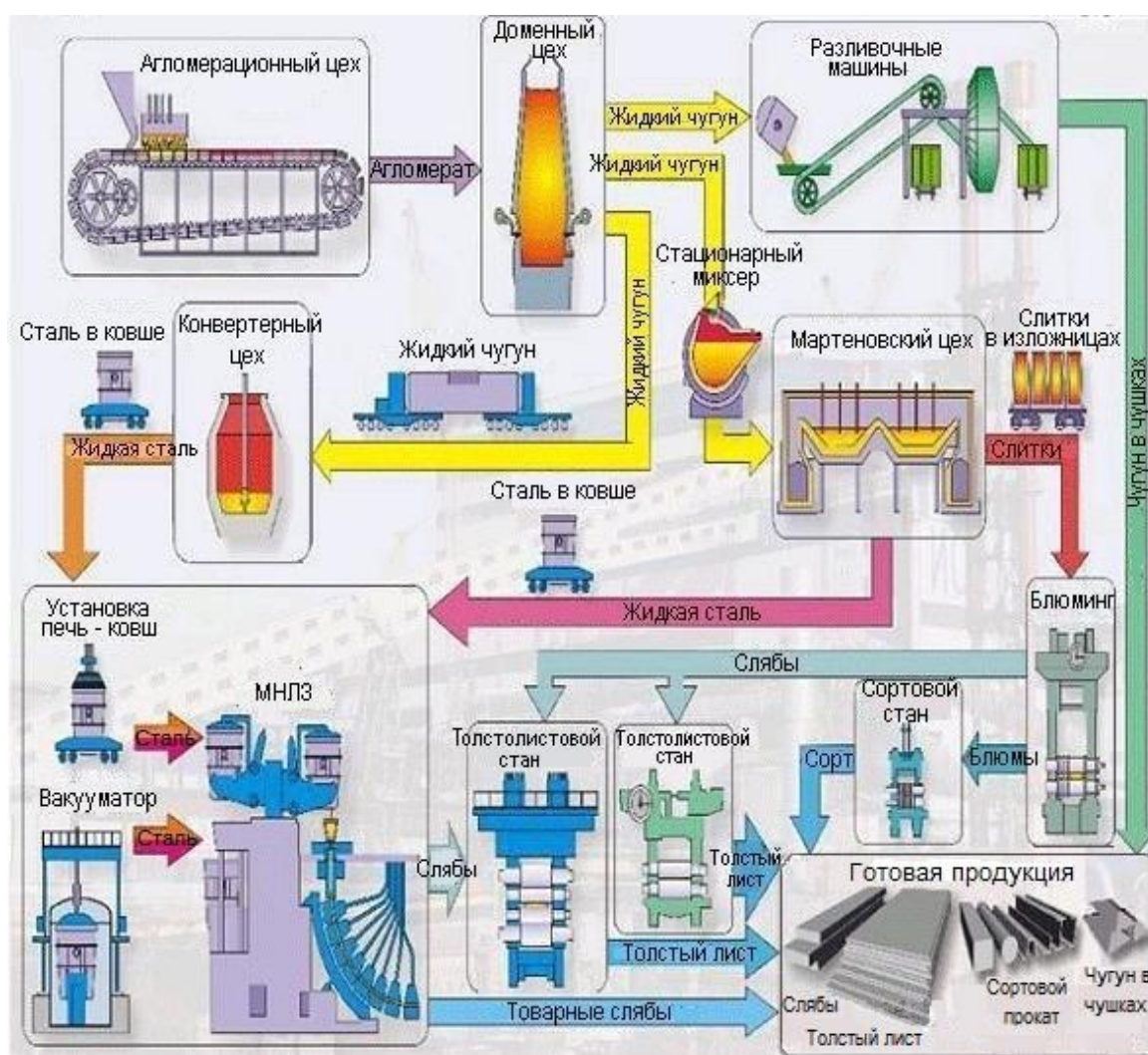


Рис. 1.1. Схема современного металлургического производства

- 1) шахты и карьеры по добыче руд и каменных углей;
- 2) горно-обогатительные комбинаты, где подготавливают руды к плавке;
- 3) коксохимические заводы или цехи, где из угля получают кокс, а так-

же другие полезные химические продукты;

4) энергетические мощности – это электростанция, цехи для получения сжатого воздуха (для дутья доменных печей) и кислорода (для кислородного конвертера);

5) доменные цехи для выплавки чугуна и ферросплавов (ферросилиций, ферромарганец и др.);

6) заводы для производства ферросплавов (для легирования специальных сталей);

7) сталеплавильные цехи (конвертерный, мартеновский, электросталеплавильный);

8) прокатные цехи, в которых слитки стали прокатывают в сортовой прокат: балки, рельсы, прутки, уголки, листы.

1.2. Материалы для производства чугуна и стали

Исходными материалами для производства чугуна и стали являются руды, флюсы, топливо, огнеупоры.

Руда состоит из минералов, содержащих металл, и пустой породы. В минералах металлы находятся в виде химических соединений (окислы, силикаты, карбонаты, сернистые соединения).

Промышленной рудой называют горную породу, из которой при данном уровне развития техники целесообразно извлекать металлы.

Для железных руд промышленным является содержание 30–50 % железа, для медных руд – 1–5 % меди, для молибденовых руд – 0,005–0,02 % молибдена.

В железных рудах железо находится в различных соединениях. Магнитный железняк содержит магнитную окись железа Fe_3O_4 (55–60 % железа). Наиболее крупное месторождение этой руды – Курская магнитная аномалия. В красном железняке Fe_2O_3 тоже содержится 55–60 % железа. Бурый железняк включает гидраты окислов железа $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (37–55 % железа). Остальное – пустая порода, состоящая из SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO .

Флюсы – это материалы, которые загружают в печь для образования легкоплавкого соединения с пустой породой. Это соединение называется *шлаком*. Шлак должен быть легче металла и всплывать на поверхность.

Шлак играет полезную дополнительную роль в процессе плавки: он защищает жидкий металл от вредного влияния воздуха.

Шлаки бывают *кислые*, если в их состав входят кислые окислы SiO_2 и P_2O_5 , и *основные*, если в их состав входят основные окислы CaO , FeO и т. д.

При высоких температурах рабочего пространства печи шлаки могут взаимодействовать с футеровкой печи и выводить её из строя.

Например, если печь выложена кирпичом из основного материала, введение кислых флюсов приведет к разрушению футеровки. При плавке в печах с кислой футеровкой используют кислый флюс – кварцевый песок SiO_2 , а в печах с основной футеровкой – известняк (CaCO_3) или доломит

($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$).

Топливо. Главными видами топлива в металлургических печах являются кокс, природный газ, мазут, а также доменный, или колошниковый газ.

Кокс получают в коксовых печах сухой перегонкой при температуре 1000°C (без доступа воздуха) каменного коксующегося угля. В процессе коксования угольная масса размягчается, из нее выделяются газообразные продукты, затем уголь превращается в пористую массу – кокс. Из газообразных продуктов получают бензол, фенол, каменноугольную смолу, CO_2 и другие ценные продукты.

Процесс коксования длится 14–16 часов. Затем кокс выталкивают из печи и тушат водой. Дополнительно применяются в качестве топлива природный газ, мазут.

Огнеупорные материалы. В современных металлургических печах процесс плавки ведётся при высоких температурах. Поэтому внутреннюю облицовку (футеровку) печей и ковшей для разлива жидкого металла делают из огнеупорного материала.

Огнеупорные материалы применяют в виде кирпичей и порошков. По химическим свойствам огнеупоры подразделяются на кислые, основные и нейтральные.

Материалы, содержащие большое количество кремнезёма SiO_2 , называются *кислыми* (динасовый кирпич). Материалы, содержащие основные окислы CaO и MgO , называются *основными* (магнезитовый, доломитовый кирпич). Материалы, содержащие большое количество Al_2O_3 и Cr_2O_3 , называются *нейтральными* (шамотный хромомagneзитовый кирпич). Углеродистый кирпич содержит до 92 % C.

Огнеупорность магнезитовых кирпичей составляет около 2000°C . Доломитовых – до 2000°C . Шамотный и динасовый кирпичи имеют огнеупорность до 1730°C .

1.3. Производство чугуна

Выплавка чугуна производится в доменных печах. Сущность процесса получения чугуна заключается в восстановлении чистого железа из окислов, входящих в состав руды, с помощью оксида углерода CO, водорода H_2 и сажастого твёрдого углерода при температурах ниже температуры плавления железа. При этом из руды получают твёрдое губчатое железо. Затем губчатое железо насыщается углеродом, при этом температура плавления его понижается, и оно переходит в жидкое состояние в виде чугуна.

1.3.1. Технология доменной плавки

- Послойная загрузка шихты в доменную печь;
- горение топлива;
- восстановление железа из руды;
- науглероживание железа и его расплавление;

- восстановление кремния и марганца и переход их в образующийся чугун;
- шлакообразование;
- восстановление серы и фосфора;
- выпуск шлака и жидкого чугуна;
- разливка чугуна на чушки или транспортировка в жидком состоянии для передела в сталь.

1.3.2. Устройство и работа доменной печи

Доменная печь (рис. 1.2) – печь шахтного типа. Имеет снаружи стальной кожух, выложенный изнутри огнеупорным шамотным кирпичом. Рабочее пространство печи включает колошник 6, шахту 5, распар 4, заплечики 3, горн 1, лещадь 15. В верхней части колошника находится засыпной аппарат 8, через который в печь загружают шихту слоями (*колошами*). Шихта состоит из обогащённой руды (концентрата) в виде кусков размером 30–50 мм, кокса и флюсов. Из мелких фракций руды предварительно готовят агломерат или окатыши. *Агломерат* получают путем спекания на агломерационной фабрике мелких (менее 10 мм) частиц концентрата с коксом и флюсом. *Окатыши* получают из пылевидных фракций путем окомкования в шарики размером 30 мм и обжига.

Взвешенные порции шихты и кокса с помощью вагонетки скипового подъёмника по наклонному мосту 12 поднимаются к засыпному аппарату 8, где вагонетка опрокидывается, и шихта высыпается в приёмную воронку 7 малого конуса. При опускании малого конуса 10 шихта попадает в чашу 11 большого конуса. После чего малый конус поднимается, опускается большой конус 13, и шихта попадает в печь. Такая последовательность работы механизмов засыпного аппарата необходима для предотвращения выхода колошниковых газов из доменной печи в атмосферу.

Все механизмы засыпного аппарата, скипового подъёмника и вагонетов работают автоматически по заданной программе.

В процессе работы печи шихта постепенно опускается, а новые порции шихты постоянно добавляются. В верхней части горна находятся фурменные устройства 14 для подачи через фурмы 2 нагретого воздуха, необходимого для горения кокса. По мере скопления чугуна и шлака их выпускают из печи: чугун – через чугунную лётку 17, а шлак – через шлаковую лётку 16.

Доменная печь может работать только на нагретом до 1000 °С воздухе. Нагретый воздух, необходимый для горения кокса, поступает в печь через фурмы из воздухонагревателей 9.

Внутри воздухонагревателя (рис. 1.3) имеется камера сгорания 2 и насадка 4. Насадка выложена из огнеупорных кирпичей 3 так, что между ними образуются вертикальные каналы. В нижнюю часть камеры сгорания к горелке 1 подается очищенный от пыли колошниковый газ, который сгорает и, проходя через насадку, нагревает её. Затем подача газа к горелке прекра-

щается, и через насадку пропускается холодный воздух. Воздух, проходя через воздухонагреватель, нагревается до 1000–1200 °С и поступает через фурмы в доменную печь.

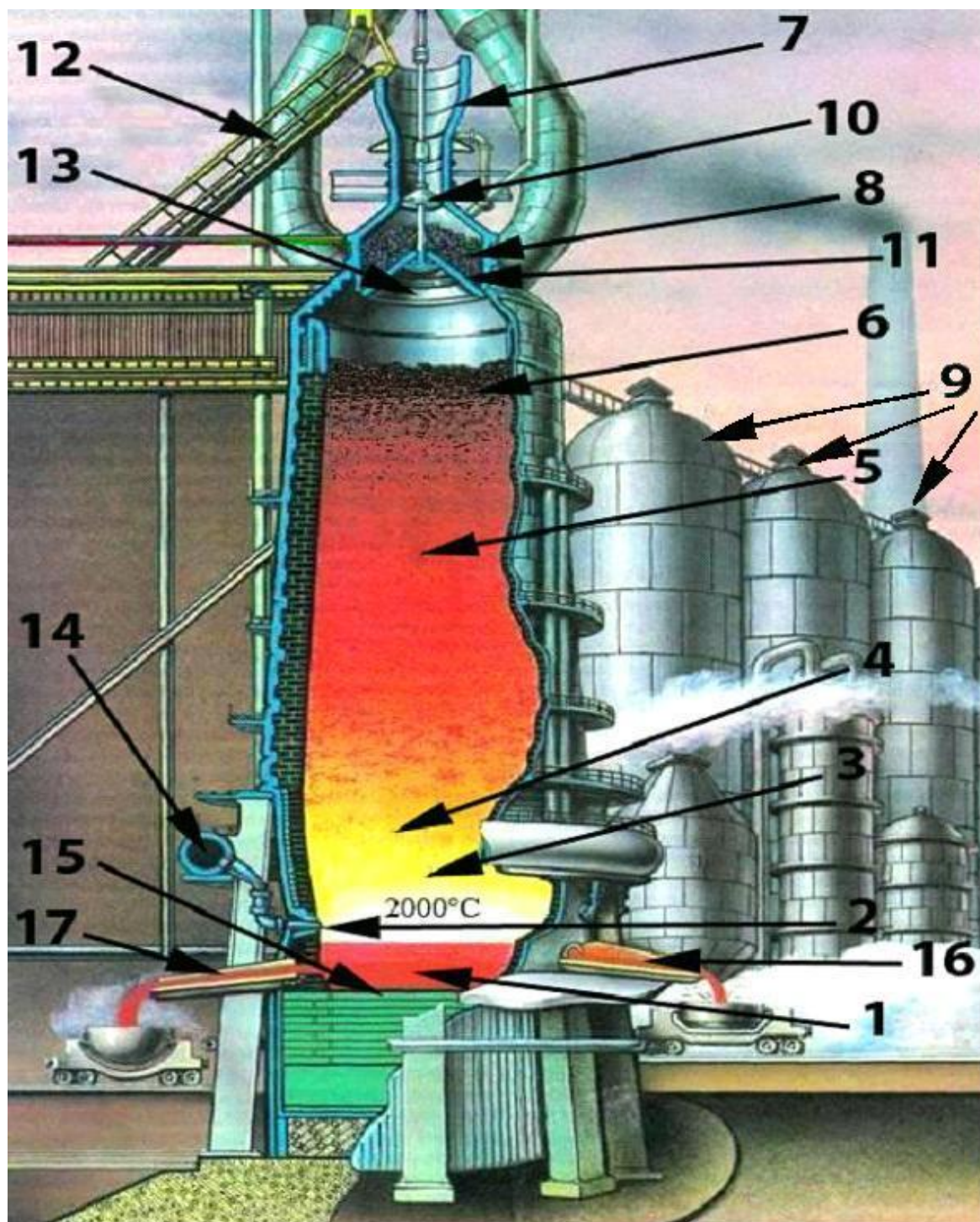


Рис. 1.2. Устройство доменной печи

1.3.3. Реакции металлургического процесса доменной печи

1. Горение топлива. В нижних зонах печи на уровне фурм происходит горение кокса $C + O_2 = CO_2$. При этом температура повышается до 2000 °С.

Углекислый газ, взаимодействуя с коксом, восстанавливается до окиси углерода: $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$. При использовании природного газа дополнительно выделяются CO и H_2 .

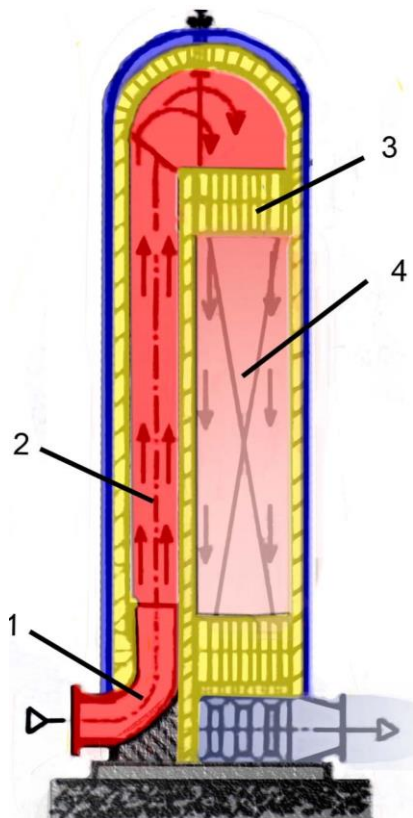
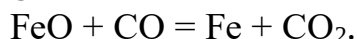
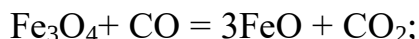
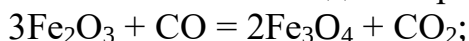


Рис. 1.3. Устройство
воздухонагревателя

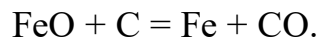
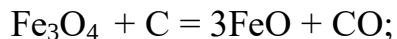
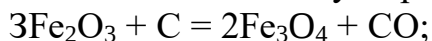
2. Восстановление железа. Окись углерода и углерод имеют большее сродство к кислороду, чем железо. Поэтому, уже начиная с температуры 600°C , углерод, окись углерода и водород отбирают кислород у твёрдых окислов железной руды, восстанавливая чистое губчатое железо в твёрдом состоянии.

Восстановление железа идет по реакциям:



Это так называемое **косвенное восстановление** протекает при температурах $500\text{--}900^\circ\text{C}$.

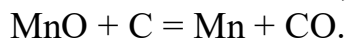
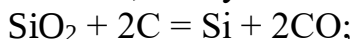
При температурах $900\text{--}1100^\circ\text{C}$ происходит **прямое восстановление** железа углеродом:



3. Восстановленное железо образует твёрдую губчатую массу. Соприкасаясь с углеродом кокса и реагируя с окисью углерода, железо насыщается углеродом. Температура его плавления понижается, и науглероженное железо переходит в жидкое состояние.

Стекая вниз по кускам раскаленного кокса, железо дополнительно науглероживается и в виде чугуна накапливается в горне печи.

4. Параллельно с восстановлением железа восстанавливаются углеродом кремний и марганец из оксидов, поступающих в печь с шихтой:



Марганец и кремний растворяются в железе, легируя чугун.

5. Пустая порода, зола топлива и флюсы образуют легкоплавкое соединение, не смешивающееся с чугуном – **шлак**. Шлак легче чугуна и поэтому располагается на поверхности.

6. Сера, содержащаяся в коксе и железорудных материалах, частично ($\sim 10\%$) удаляется из печи с газами, оставшаяся сера распределяется между чугуном и шлаком. Практически весь фосфор, содержащийся в доменной шихте, восстанавливается и переходит в чугун.

По мере накопления чугуна и шлака их выпускают из печи. Шлак – через шлаковую лётку в шлаковую чашу. Чугун спускают через чугунную лётку в чугуновозный ковш. Ёмкость чугуновозных ковшей $90\text{--}140\text{ т}$. В них чу-

гун транспортируется в сталеплавильный цех для передела в сталь или на разливочные машины, где его разливают в формы. Чугун в них затвердевает в виде слитков – *чушек* весом 45 кг.

Часто шлак не сливают в шлаковые чаши, а для удобства использования подвергают жидкой грануляции: на него направляют струю воды, под действием которой он рассыпается на мелкие гранулы.

1.3.4. Продукты доменной плавки

В доменных печах получают три продукта: чугун, шлак и колошниковый газ.

Чугун – основной продукт доменной плавки. В зависимости от назначения получают чугун разного химического состава.

1. *Передельный чугун* выплавляют для передела его в сталь в конвертерах или мартеновских печах. Он содержит 4 % С; 0,6 % Si; до 1 % Mn; до 0,3 % P; до 0,07 % S.

Передельный чугун выплавляют трёх видов:

- а) коксовый М1, М2, М3, Б1, Б2;
- б) фосфористый МФ1, МФ2, МФ3;
- в) высококачественный ПВК1, ПВК2, ПВК3.

Чугуны М1–М3 предназначены для мартеновских печей, Б1 и Б2 – для кислородных конвертеров;

МФ1–МФ3 – фосфористые чугуны для мартеновской печи;

ПВК1–ПВК3 – передельные высококачественные чугуны.

По содержанию вредных примесей Р и S чугуны разделяются:

- а) по фосфору – на классы А, Б и т. д.
- б) по сере – на категории I, II, и т. д.

2. *Литейный чугун* применяется для получения литых деталей. Марки ЛКО, ЛК1–ЛК5 имеют повышенное содержание кремния для увеличения жидкотекучести.

Для художественного литья применяют фосфористые чугуны, содержащие до 1,2 % Р.

3. *Доменные ферросплавы* – это сплавы Fe с Si, Mn или с другими металлами. Они применяются для легирования и раскисления стали.

- а) Зеркальные чугуны ЗЧ1, ЗЧ2, ЗЧ3 содержат до 10–25 % Mn.
- б) Доменный ферромарганец Мн6, Мн7 содержит до 70–75 % Mn.
- в) Доменный ферросилиций Си10, Си15 содержит 9–13 % Si и до 3 % Mn.

Шлак и колошниковый газ являются побочными продуктами доменной плавки.

Гранулированный шлак используют для производства цемента, шлаковых строительных кирпичей и блоков, щебня, шлаковаты и других строительных материалов. Применяются также литые шлаковые изделия.

Колошниковый газ содержит значительное количество горючих составляющих (26–32 % CO, до 4 % H₂). После очистки от пыли он использует-

ся для нагрева воздуха (в воздухонагревателях), а также в качестве топлива в цехах металлургического завода.

Основным показателем эффективности доменного процесса является *коэффициент использования полезного объёма печи* (КИПО), равный отношению полезного объёма печи в м³ к среднесуточной выплавке чугуна в тоннах. КИПО современных доменных печей приближается к 0,4 м³/т.

Важным показателем доменной плавки является *удельный расход кокса* на одну тонну выплавляемого чугуна, он составляет 450–550 кг/т.

1.4. Производство стали

1.4.1. Сущность процесса

1. Сталь производят из передельного чугуна и стального лома (скрапа).
2. Сталь отличается от чугуна более низким содержанием углерода (менее 2,14 %) и примесей (P, S, Mn, Si и др.).
3. При переделе чугуна в сталь углерод удаляют путём его окисления при продувке через жидкий чугун воздуха или кислорода.
4. Примеси MnO, SiO₂, P, S удаляют путём перевода их в шлак.
5. Сталь в процессе получения насыщается кислородом. Сталь, содержащая кислород, непригодна для обработки давлением (ковки, прокатки), так как в ней образуются трещины при деформации в нагретом состоянии.
6. Для удаления кислорода из стали в процессе плавки её раскисляют, т. е. вводят в неё элементы с большим сродством к кислороду (марганец и кремний в виде ферросплавов и металлический алюминий).

Раскисление является завершающим этапом выплавки стали.

Сталь производят в различных металлургических агрегатах, имеющих разный принцип действия: конвертеры, мартеновские печи, электропечи.

1.4.2. Производство стали в кислородных конвертерах

Конвертер представляет собой сосуд грушевидной формы (рис. 1.4). Снаружи конвертер обшит стальными листами 3, внутри выложен огнеупорным материалом (футеровка 4). Заливка чугуна и завалка скрапа производится через горловину; разливка стали – через лётку.

Конвертер выполнен поворотным на цапфах 5, что необходимо для загрузки скрапа, заливки чугуна и слива шлака и готовой стали. Фурма 1 вставляется через горловину 2. Ёмкость конвертера составляет 130–500 т

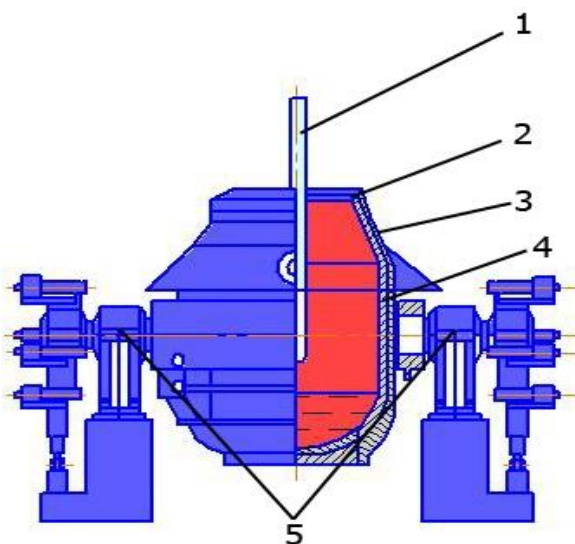


Рис. 1.4. Устройство кислородного конвертера

жидкого металла.

Кислородный конвертер был создан в XX веке в связи с бурным развитием металлургии. Конвертер позволяет увеличить производительность, а главное – снизить содержание азота в готовой стали до 0,005–0,004 % вместо 0,02 % при воздушном дутье. Технология плавки в кислородном конвертере представлена на рис. 1.5.

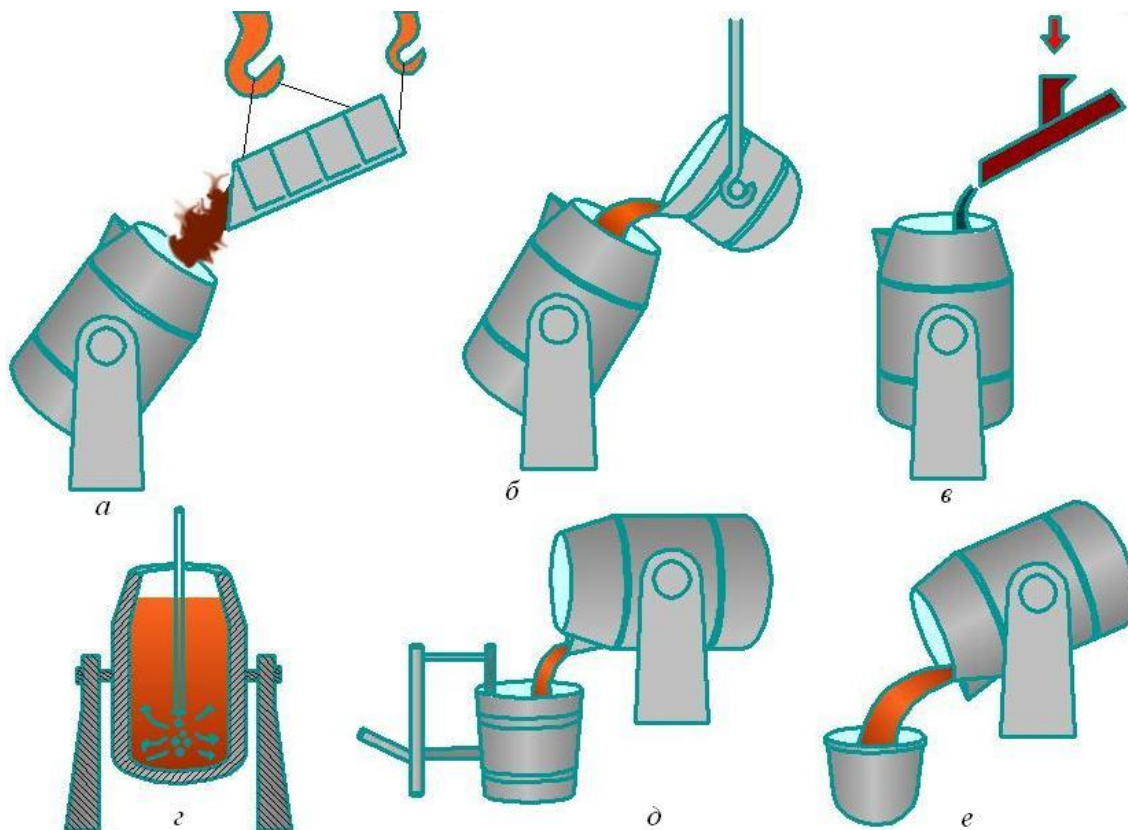
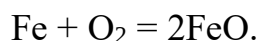


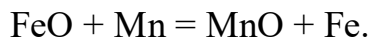
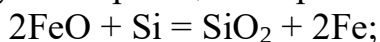
Рис. 1.5. Последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородных конвертерах

Шихтовые материалы загружают через горловину конвертера: в первую очередь скрап (рис. 1.5, а), а затем заливают чугун (рис. 1.5, б). Количество стального лома составляет 25–30 % от массы чугуна. Чугун содержит 3,7–4,4 % углерода; 0,5–1,5 % марганца; 0,5–1,5 % кремния; 0,03–0,08 % серы и не более 0,3 % фосфора. Температура заливаемого чугуна составляет 1250–1400 °С. После загрузки шихтовых материалов внутрь конвертера через горловину вводят кислородную фурму и начинают подавать кислород (рис. 1.5, в). Одновременно с началом продувки и далее по мере надобности в конвертер загружают шлакообразующие материалы (флюсы), обычно известь CaO (рис. 1.5, в).

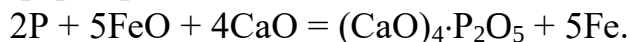
В зоне контакта с кислородной струёй (давление 0,9–1,4 МПа) кислород окисляет все примеси, однако наиболее интенсивно окислятся железо:



Закись железа переходит в сталь и в шлак. После этого закись железа FeO, растворённая в металле, вступает в реакцию с примесями и удаляет их в шлак:



Удаление фосфора происходит за счёт окисления и ошлакования:

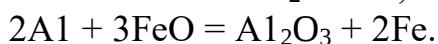
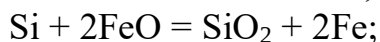
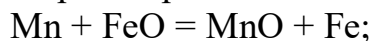


Образовавшийся фосфат кальция легче жидкого металла, поэтому всплывает на поверхность и удаляется в шлак. При повышенном содержании фосфора (более 0,15 %) производят промежуточный слив шлака и наведение нового путём загрузки извести.

Удаление серы происходит по реакции: $\text{FeS} + \text{CaO} = \text{CaS} + \text{FeO}$ с переходом CaS в шлак.

Подачу кислорода заканчивают, когда содержание углерода в металле будет соответствовать заданному содержанию в стали. При излишке марганца и кремния делают кратковременную додувку; при излишке высокой температуре загружают стальной лом. Готовая сталь имеет температуру 1580–1650 °С.

Для уменьшения содержания кислорода производят раскисление стали. Для этого при выпуске стали из конвертера в ковш добавляют ферромарганец, ферросилиций и чистый алюминий. Раскисляющие элементы, соединяясь с кислородом, образуют нерастворимые окислы, всплывающие в шлак:



Легированные стали трудно выплавлять в конвертерах, так как легирующие добавки быстро окисляются. Поэтому легирующие элементы при выплавке легированных сталей, для предотвращения их выгорания, вводят в виде ферросплавов в ковш, чаще всего, расплавив предварительно в электропечи. После этого в ковш выливают готовую сталь (рис. 1.5, *д*), а затем выпускают шлак (рис. 1.5, *е*).

Плавка в конвертере ёмкостью 130–300 т заканчивается через 25–50 минут. Производительность конвертера ёмкостью 300 т составляет 400–500 т стали в час, а в мартеновских и электропечах – не более 80 т/час. Расход кислорода колеблется в пределах от 1,8 до 4 м³ на тонну стали.

Конвертерная сталь – самая дешёвая, обыкновенного качества, однако выплавляется в больших количествах. В связи с трудностью ввода в конвертер легирующих элементов, особенно легкоокисляющихся, в них выплавляют углеродистые и низколегированные (с содержанием легирующих элементов около 2–3 %) конструкционные и инструментальные стали.

1.4.3. Производство стали в мартеновских печах

Мартеновская печь была разработана в 1864 г. французскими металлургами Э. Мартеном и его сыном П. Мартеном.

Выпуск мартеновской стали непрерывно сокращается, и в настоящее

время в мартеновских печах выплавляется около 4 % общемирового объёма производства стали.

Мартеновская печь (рис. 1.6) – это пламенная отражательная регенеративная печь.

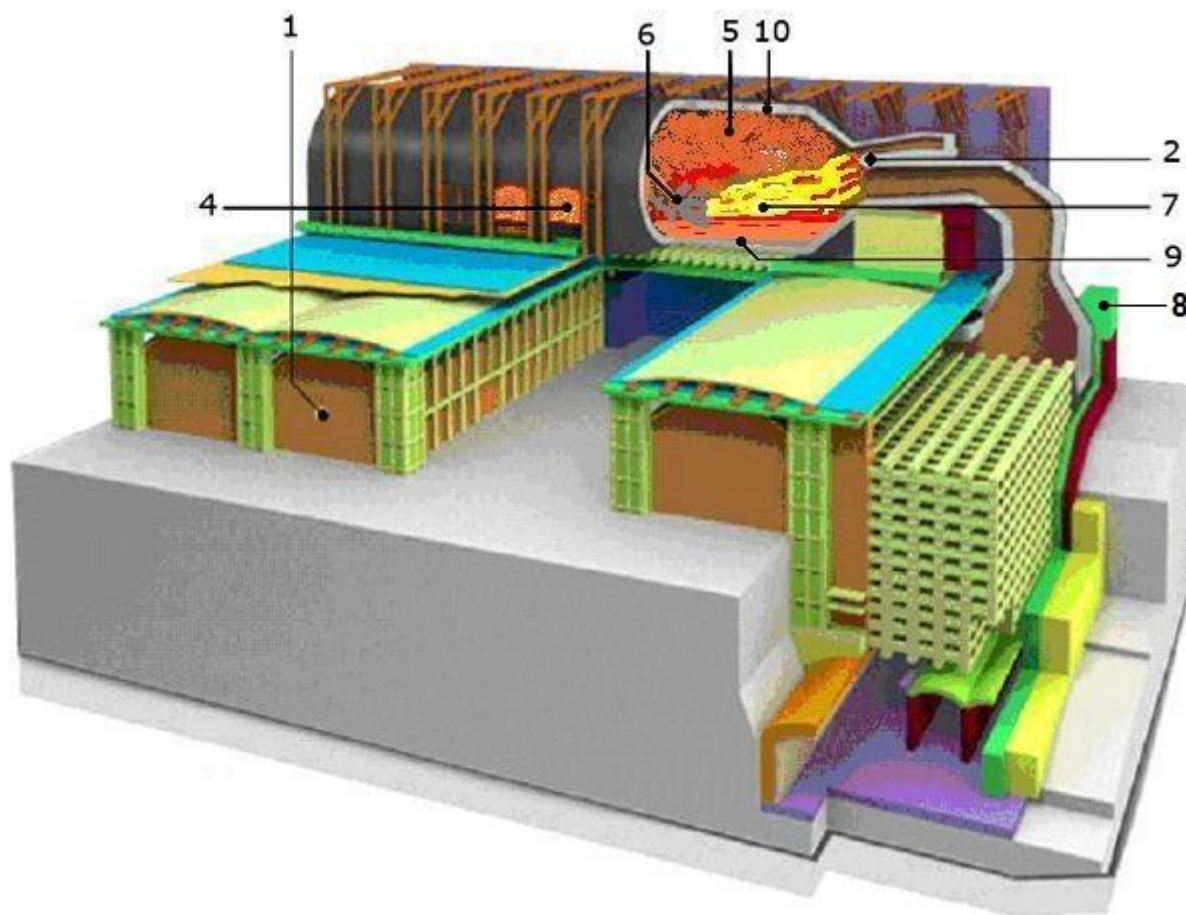


Рис. 1.6. Схема мартеновской печи

Работает на газообразном (природный газ) или жидком топливе (мазут). Она имеет рабочее пространство 5, ограниченное снизу подиной 9, сверху – сводом 10, а с боков – передней и задней стенками. Подина имеет форму ванны. Футеровка печи может быть основной и кислой. Если в процессе плавки стали в шлаке преобладают основные оксиды, процесс называется *основным мартеновским процессом* (футеровка должна быть основной), если же преобладают кислотные оксиды – *кислым* (футеровка должна быть кислая). Футеровку основной мартеновской печи изготавливают из магнезитового кирпича, а верхний рабочий слой подины набивают магнезитовым порошком. В передней стенке печи находятся загрузочные окна 4 для подачи шихты в печь. В задней стенке печи имеется лётка для слива стали. Перед плавкой лётку заделывают малоспекающимися огнеупорами.

Для подогрева воздуха при работе на газообразном топливе печь имеет два регенератора 1. Регенератор представляет собой камеру, в которой размещена насадка – огнеупорный кирпич, выложенный в клетку. Температура

отходящих из печи газов составляет 1500–1600 °С. Попадая в регенераторы, они нагревают насадку до 1250–1280 °С, а охлаждённые до 500–600 °С газы уходят в заводскую трубу 8. Нагретый воздух поступает в головку печи 2, где смешивается с топливом и образует факел 7, направленный на шихту 6.

После охлаждения правого регенератора происходит переключение клапанов, и поток газов в печи изменяет направление. Теперь воздух поступает через левый регенератор, а правый становится на нагрев. Ёмкость мартеновских печей колеблется в широких пределах. Для выплавки небольшого количества стали используют малые печи ёмкостью 30–80 т.

В России на металлургических заводах используются печи на 250–900 т с размером ванны до 25×6 м. Чем крупнее печь, тем выше её экономическая эффективность.

Продолжительность плавки в малых печах составляет от 3 до 6 часов, в средних – до 12 часов. Мартеновская печь работает непрерывно до остановки на капитальный ремонт через 400–600 плавов (кампания печи).

Шихта для мартеновских печей состоит из следующих компонентов:

- 1) доменный передельный чугун марок М1, М2, М3 в жидком состоянии или в виде чушек;
- 2) стальной скрап;
- 3) флюс;
- 4) раскислители.

Разновидности мартеновского процесса

Мартеновские печи и, соответственно, процессы плавки в них могут быть основными и кислыми.

Мартеновскую сталь выплавляют, главным образом, основным процессом, который разделяется на скрап-процесс и скрап-рудный процесс.

1. ***Скрап-процесс***, при котором основную массу шихты составляет скрап с добавкой чушек чугуна, применяется на малых печах (до 100 т) на машиностроительных заводах, где нет доменных печей.

2. ***Скрап-рудный процесс***, при котором основная часть шихты состоит из жидкого чугуна (до 75 %), а твёрдая часть – из скрапа и руды, применяется на средних и крупных печах на металлургических заводах, где есть доменные печи.

Кислый мартеновский процесс применяется в небольших печах с кислой футеровкой, где нельзя использовать известь, следовательно, удалять из металла серу и фосфор. Поэтому требуется очень чистая шихта по сере и фосфору. Это дорого.

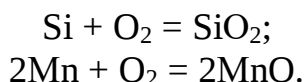
Мартеновский основной скрап-процесс металлурги разделяют на ряд периодов плавки стали.

1. Заправка печи проводится перед каждой очередной плавкой. Она заключается в ремонте (заделке) повреждений подины. В эти места – щели, трещины – насыпают магнезитовый или доломитовый порошок.

2. Завалка (загрузка) шихтовых материалов осуществляется через за-

грузочные окна завальными машинами (скрап, известняк и чугун в чушках).

3. Период плавления. При плавлении чугуна и скрапа Si и Mn чугуна окисляются почти полностью избыточным кислородом печных газов:

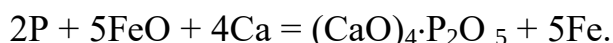


Известь при нагреве разлагается:



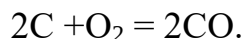
Образуется слой шлака из окислов, и окисление металла непосредственно кислородом пламени прекращается.

В период плавления создаются благоприятные условия для удаления фосфора:



Эта реакция называется процессом дефосфорации.

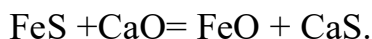
4. Период кипения ванны. Для этого в печь подают некоторое количество железной руды или вставляют сверху фурму 3 и продувают ванну кислородом. Происходит интенсивное выгорание из стали избытка углерода с образованием угарного газа:



Пузырьки CO всплывают на поверхность, и ванна начинает «кипеть». При этом шлак вспенивается, начинает увеличиваться в объёме и выливается через одно из окон в шлаковый ковш. Эта реакция называется главной в мартеновской плавке, так как из-за энергичного перемешивания металла:

- а) выравнивается температура металла в ванне;
- б) за счет выгорания углерода происходит доводка химического состава стали по углероду;
- в) пузырьки CO, поднимаясь на поверхность, захватывают с собой вредные газы N_2 и H_2 и шлаковые капли – чистота стали повышается;
- г) выравнивается химический состав стали.

5. Десульфурация стали – это процесс удаления серы. Наиболее активно протекает в конце периода кипения. При так называемом чистом кипении, когда шлак почти вылился, продувка кислородом прекращается, и ванна продолжает кипеть за счет остатков растворённого кислорода. Сера удаляется по реакции:



Этому способствует наличие большого количества CaO в шлаке (45–50 % CaO), уменьшение количества закиси железа FeO, нагрев металла до самой высокой температуры. Если в шлаке и стали будет много FeO, то по закону действующих масс реакция не пойдёт.

Начиная с расплавления шихты, до выпуска стали из печи, регулярно отбирают пробы металла и шлака для химического экспресс-анализа состава. Если содержание углерода, серы и фосфора соответствует заданному, приступают к раскислению стали. Если нет, то снова подают в печь флюс, производят продувку стали кислородом, вспенивают шлак, скачивают его в ков-

ши, при этом происходит снижение содержания С, S и Р. Иногда вместо кислорода подают в печь чистую по сере и фосфору руду.

6. Раскисление металла производят в два этапа: а) за счет подачи в печь ферромарганца и ферросилиция; б) окончательно – в ковше при разливке стали, предварительно засыпав в ковш порцию алюминия и ферросилиция.

Основным скрап-процессом, как правило, выплавляют спокойную, качественную сталь. При выплавке легированных сталей легкоокисляющиеся легирующие элементы (Cr, V, Ni и Mo) в виде ферросплавов вводят в ванну после раскисления.

Выплавка стали *основным скрап-рудным процессом* протекает в этой же последовательности, разница только в том, что после завалки скрапа, руды, известняка и их прогрева в печь заливают жидкий чугун, который взаимодействует с железной рудой и скрапом.

Эффективность получения стали в мартеновских печах оценивается *средним съёмом стали* с 1 м² площади пода в сутки и *расходом топлива* на тонну выплавляемой стали. Средний съём стали в современных мартеновских печах составляет около 10 т/м² в сутки, а расход условного топлива – около 80 кг/т стали.

Дополнительными характеристиками мартеновской плавки являются расход кислорода на тонну стали, расход жидкого чугуна в кг/т, и себестоимость одной тонны стали.

Мартеновской плавкой получают углеродистые стали и ряд марок легированных сталей. При этом основным скрап-рудным процессом преимущественно получают углеродистые стали, так как чугун, известняк и железная руда вносят в металл много вредных примесей. Наиболее качественную, чаще всего легированную, сталь получают основным скрап-процессом без применения руды. Вместо руды в этом случае для проведения реакции вспенивания применяют кислород.

Кислый мартеновский процесс позволяет получать как углеродистые, так и легированные стали, но требует сверхчистого по сере и фосфору металлолома в большом количестве (до 50 % от массы чугуна).

1.4.4. Производство стали в электропечах

Производство стали в электропечах имеет ряд преимуществ по сравнению с другими плавильными агрегатами. В электропечах можно быстро нагревать и плавить металл, выплавлять высококачественные стали.

Электропечи используют для выплавки конструкционных сталей ответственного назначения, высоколегированных инструментальных, нержавеющих и других специальных сталей.

Электроплавильные печи могут быть дуговыми и индукционными.

Выплавка стали в электрических дуговых печах

Процесс электродуговой выплавки стали появился в конце XIX–начале XX века. В этих печах в качестве источника тепла используют электриче-

скую дугу, возникающую между электродами и металлической шихтой.

Ёмкость дуговых печей колеблется от 0,5 до 400 т. Рабочее напряжение в малых печах 100–200 В, в больших – 400–600 В. Сила тока – до десятков тысяч ампер. Длина дуги регулируется автоматически. Электроды имеют основную или кислую футеровку.

В металлургических цехах обычно используют печи с основной футеровкой, в литейных – с кислой. Однако бóльшая доля электростали выплавляется в основных печах. Применяют два вида технологии плавки в основных печах: на углеродистой шихте и на легированной.

Дуговая электросталеплавильная печь (рис. 1.7) питается трёхфазным переменным током, имеет три электрода 9, изготовленных из графитизированной массы. Электрический ток от трансформатора подается гибкими кабелями 7 к электрододержателям 8. Между электродами и шихтой 3 горят дуги 13. Рабочее напряжение 180–600 В, сила тока 1–10 кА. Во время работы печи длина дуги регулируется автоматически путем вертикального перемещения электродов.

Снаружи печь имеет стальной кожух 4, изнутри футерована огнеупорным кирпичом 1 (основным – магнезитовым, или кислым – диносовым). Подина 12 печи набивается огнеупорной массой. Печь имеет стенки 5 и съёмный свод 6. Для ведения плавки имеется рабочее окно 10, для слива металла – жёлоб 2. Печь можно наклонять с помощью механизма 11.

Плавка на углеродистой шихте чаще применяется для производства конструкционных углеродистых сталей и имеет много общего с мартеновским скрап-процессом.

Шихта состоит из 90 % стального скрапа и 10 % передельного чугуна М1 или М2. Флюс – известь. Шихта должна быть чистой по сере и фосфору.

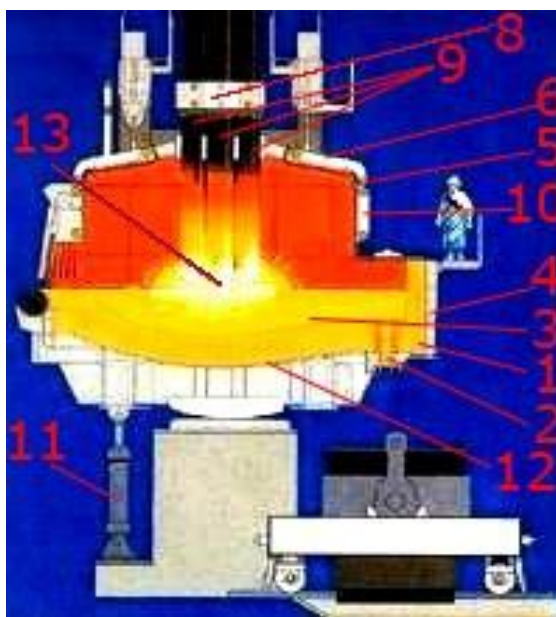


Рис. 1.7. Схема дуговой электрической плавильной печи

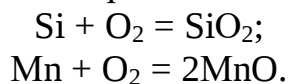
Плавка состоит из следующих периодов.

1. Заправка печи.

2. Завалка шихты. В старых печах шихту загружают через рабочие окна завалочными машинами. В новых крупных печах шихта загружается сверху. Для этого свод поднимается и отводится в сторону.

После загрузки электроды опускают, под них подкладывают куски кокса (для облегчения зажигания дуги) и включают ток. При опускании электродов в шихте проплавляются колодцы.

3. Образуется шлак, как и в мартеновской печи:



4. Окислительный период (в мартеновском процессе это период кипения).

После расплавления металла и шлака и нагрева ванны до 1500 °С в печь загружают железную руду и известь. Содержащийся в руде кислород интенсивно окисляет углерод и вызывает кипение ванны: $\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$.

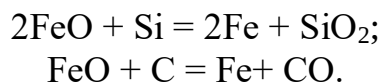
Шлак вспенивается, уровень его повышается. Для выпуска шлака печь наклоняют в сторону рабочего окна, шлак стекает в шлаковую чашу. Кипение ускоряет нагрев ванны, удаление из металла газов, неметаллических включений, способствует удалению фосфора.

Шлак удаляют, руду и известь добавляют 2–3 раза, пока не доведут содержание фосфора в стали до 0,01 %.

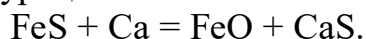
5. Восстановительный период плавки включает раскисление металла и удаление серы, а также доводку химического состава стали до заданного. Раскисление электростали, в отличие от мартеновской и конверторной стали, производят комбинированным путем: глубинным (осаждающим) и диффузионным.

Для *глубинного раскисления* в печь загружают ферромарганец, ферросилиций и алюминий.

Затем металл раскисляют *диффузионным способом*. Сущность его заключается в следующем: раскисляют не металл, а шлак, восстанавливая в нем FeO:



В соответствии с законом действующих масс, уменьшение содержания оксида FeO в шлаке вызывает его интенсивный диффузионный переход из металла в шлак, чем и обеспечивается раскисление металла. Этот метод позволяет почти полностью раскислить металл. Процесс протекает в шлаке и на границе шлак – металл. При этом металл не загрязняется неметаллическими включениями. Удаление серы в виде CaS обеспечивается значительно лучше, чем в мартеновской печи. Это объясняется высокой основностью шлака и хорошей раскисленностью шлака и металла. Эти условия необходимы, чтобы протекала реакция десульфурации металла:



По ходу восстановительного периода берут пробы для определения химического состава стали. После этого следует выпуск металла из печи в ковш.

При выплавке легированных сталей по этой технологии в сталь вводят легирующие элементы в виде ферросплавов. Порядок ввода определяется сродством легирующих элементов к кислороду.

Никель, молибден, вольфрам и другие не окисляющиеся в ходе плавки элементы вводят в период плавления или в окислительный период. Хром – легко окисляющийся элемент – вводят в восстановительный период. Кремний, ванадий, титан – наиболее сильно окисляющиеся элементы – вводят перед выпуском в ковш.

Плавку на легированной шихте производят из отходов легированных сталей (например, быстрорежущую сталь выплавляют из отходов быстрорежущей стали; нержавеющую сталь – из отходов нержавеющей стали). По сути, это переплав. После расплавления шихты металл доводят (если требуется) до химического состава (добавляют углерод, ферросплавы). В процессе плавки в жидкую сталь может попасть кислород из воздуха и из загрязнённой шихты. Производят его удаление путём раскисления ферромарганцем, ферросилицием, алюминием, ферротитаном и выпускают сталь в ковш, т. е. нет периодов кипения, дефосфорации, рафинирования, восстановления.

Кислый процесс в электродуговых печах имеет те же особенности, что и кислый процесс в мартеновских печах, т. е. для выплавки используют чистую по сере и фосфору шихту. В качестве флюса применяют песок SiO_2 . Кислая футеровка обладает значительно большей стойкостью и дешевле основной. Кислые печи применяются, главным образом, в литейных цехах.

Показатели плавки зависят от ёмкости печи и технологии плавки. К показателям, характеризующим эффективность электроплавки, относятся: *производительность* – т/сутки на каждые 1000 Вт, *мощность трансформатора*, *расход электроэнергии* на 1 т выплавленной стали и *расход электродов* на тонну стали.

Производительность дуговых печей составляет 12–15 т/кВт сутки. Расход электроэнергии на 1 т стали с увеличением ёмкости печи уменьшается. Например, для печи ёмкостью 25 т расход составляет 750 кВт·ч., а для печи ёмкостью 100 т – 575 кВт·ч. Расход графитизированных электродов составляет 6–9 кг/т выплавленной стали.

Выплавка в электродуговых печах применяется на металлургических и крупных машиностроительных заводах для всех марок сталей и специальных сплавов, но главным образом – для получения высококачественных легированных сталей и сплавов.

Выплавка стали в индукционных печах

Эти печи являются основными плавильными агрегатами в машиностроении. Они существенно отличаются от дуговых печей способом образования тепла для расплавления металла.

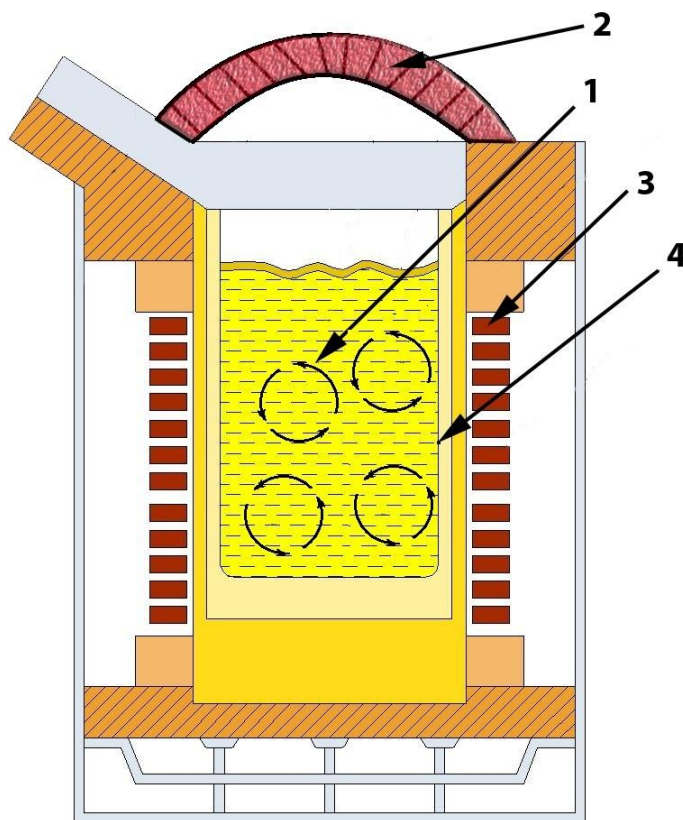


Рис. 1.8. Схема индукционной тигельной электрической плавильной печи

Индукционная высокочастотная плавильная печь (рис. 1.8) состоит из огнеупорного плавильного тигля 4 и индуктора 3, имеет съемную крышку 2. Индуктор выполнен в виде катушки из медной трубки, охлаждаемой водой. Ток подается по гибким шинам через печные конденсаторы. Необходимый для питания индукционной печи переменный ток повышенной частоты вырабатывается в машинных или ламповых генераторах (преобразователях). Обычно для индукционных печей (в отличие от закалочных агрегатов ТВЧ) применяются токи невысокой частоты: 500–2500 Гц.

При прохождении переменного тока через индуктор печи образуется переменное магнитное поле. Магнитный поток наводит во вторичном контуре (тигель с загруженным в него металлом) вихревые переменные токи (*токи Фуко*) 1. Под действием этих токов металл в тигле нагревается и расплавляется. Вихревые токи создают интенсивную циркуляцию жидкого металла, что способствует ускорению химических реакций, выравниванию температуры и состава во всем объеме расплава, всплыванию неметаллических включений.

Выплавку стали в этих печах обычно осуществляют методом переплава. Угар легирующих элементов при этом незначителен. При этом тщательно проводят расчёт химического состава шихты (количество ферросплавов, химический состав скрапа, угар).

Скрап и ферросплавы загружают одновременно, так как плавка протекает быстро и анализы химического состава по ходу плавки не делают. После

расплавления металла на его поверхность засыпают флюс. Если футеровка основная, то флюс состоит из извести и плавикового шпата для повышения жидкотекучести шлака. В кислых тиглях применяется бой стекла или SiO_2 . Для плавки берут только чистую по примесям шихту. Раскисление ферромарганцем, ферросилицием, алюминием производят перед выпуском стали. Индукционные печи имеют емкость от 10 кг до 60 т.

Индукционные печи имеют ряд преимуществ перед дуговыми. В них отсутствует электрическая дуга, и, следовательно, нет науглероживания стали за счёт электродов, нет перегрева жидкого металла (температура электрической дуги – до 6000 °С). Наличие магнитных потоков способствует хорошему перемешиванию металла по химическому составу. Внутри печи легко создать вакуум или регулируемую атмосферу из газов определённого состава. Недостатком индукционной плавки является высокая стоимость оборудования и низкая металлургическая активность шлака. Шлак нагревается только за счет тепла металлической ванны.

Индукционные печи применяются для выплавки высококачественных специальных легированных сталей и сплавов, особенно сталей с низким содержанием углерода (кислотостойкие нержавеющие стали).

1.4.5. Разливка стали

Выплавленную сталь выпускают из плавильной печи в разливочный ковш. Разливочный ковш состоит из стального кожуха, выложенного огнеупорным материалом, и дозирующего устройства. Ковш имеет ёмкость от 5 до 500 т стали. Из ковша сталь разливается в *изложницы* (чугунные формы) разного поперечного сечения. Из слитков квадратного сечения получают сортовой прокат (двутавровые балки, швеллеры, уголки, рельсы и т. д.). Слитки прямоугольного сечения прокатывают в листы, слитки круглого сечения идут для производства труб, многогранные – для поковок.

Для разливки кипящей стали применяются изложницы, расширяющиеся книзу (рис. 1.9, а), для разливки спокойной стали – изложницы, расширяющиеся кверху (рис. 1.9, б).

Изложницы для разливки спокойной стали имеют прибыльные надставки 8, футерованные внутри огнеупорной массой 9. Сталь в прибыльной надставке дольше находится в жидком состоянии и питает затвердевающий слиток металлом, благодаря чему уменьшается глубина усадочной раковины, уменьшаются отходы при обрезке его головной части. Размеры изложниц зависят от назначения слитка. Для прокатки применяют слитки массой до 60 т. Слитки легированных сталей меньше – от 500 кг до 7 т. Для поковок отливают слитки массой до 500 т.

Применяют три основных способа разливки стали: в изложницу сверху; в изложницы сифоном; на установках непрерывной разливки.

В изложницу сверху (рис. 1.9, а) сталь заливается непосредственно из ковша 1. При разливке сверху исключается расход металла на литники, обо-

рудование простое. Однако при разливке сверху сталь падает в изложницу с большой высоты, брызги металла застывают на стенках изложницы и ухудшают поверхность слитка.

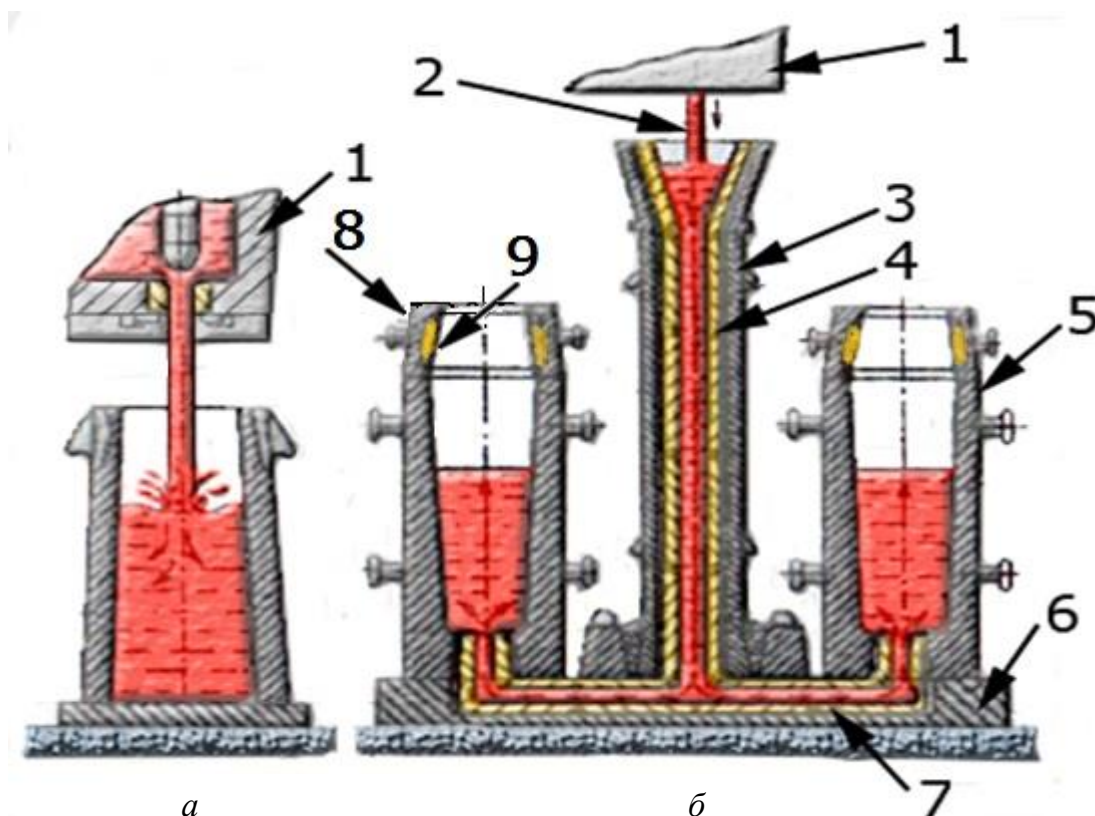


Рис. 1.9. Разливка стали в изложницы: *а* – сверху; *б* – сифоном

При **сифонной разливке** (рис. 1.9, *б*) сталью заполняют одновременно несколько изложниц. Изложницы устанавливают на поддоне 6, в центре которого находится центральный литник 3, футерованный трубками 4. Жидкая сталь 2 из ковша 1 поступает по каналу 7 в нижнюю часть изложницы 5. Этот способ разливки обеспечивает плавное, без брызг заполнение изложниц, поверхность слитка получается чистой, сокращается продолжительность разливки стали. Однако при сифонной разливке повышается трудоёмкость подготовки оборудования, увеличивается расход металла на литники.

Для легированных и высококачественных сталей применяется разливка сифоном.

Непрерывная разливка стали (рис. 1.10) состоит в том, что жидкую сталь из ковша 1 через промежуточное устройство 2 непрерывно подают в водоохлаждаемый кристаллизатор 3. Из кристаллизатора вытягивают слиток 4 вальцами 5 со скоростью порядка 1 м/мин.

На выходе из кристаллизатора слиток охлаждается струёй воды 6 и попадает в зону 7 газовой ацетилено-кислородной резки на мерные заготовки.

При непрерывной разливке слитки не имеют усадочной раковины и поступают на станы сортовой прокатки, минуя блюминги и слябинги.

Технико-экономические показатели разливки стали характеризуются *выходом годного металла*, т. е. отношением массы слитков, передаваемых на прокатку, к массе разлитой стали, *стойкостью изложниц* и *производительностью*, т/ч.

Выход годного металла при разливке спокойной стали составляет около 70 %, кипящей стали – до 80 %. Наибольший выход годного металла – до 98 % – достигается при непрерывной разливке. Стойкость изложниц составляет 100–300 заливок.

1.4.6. Способы повышения качества стали

Технология выплавки стали в любых плавильных агрегатах не позволяет получить высококачественную сталь с низким содержанием газов, вредных примесей и неметаллических включений. Поэтому процесс очистки проводят после выпуска металла из печи – в ковше или при повторном переплаве стали.

Наиболее простым способом является *продувка стали* в ковше *инертными газами*, чаще всего аргоном. Проходящие через металл пузырьки аргона адсорбируют неметаллические включения и растворяют в себе водород, азот и кислород, находящиеся в стали.

Обработка стали синтетическим шлаком позволяет удалять не только газы и неметаллические включения, но и серу. Специальный синтетический шлак, содержащий до 55 % CaO , 40 % Al_2O_3 , немного SiO_2 и MgO , предварительно расплавляют и заливают в пустой ковш. Затем туда с определённой высоты выпускают сталь. Интенсивное перемешивание стали и шлака резко повышает эффективность металлургических реакций – в сотни раз.

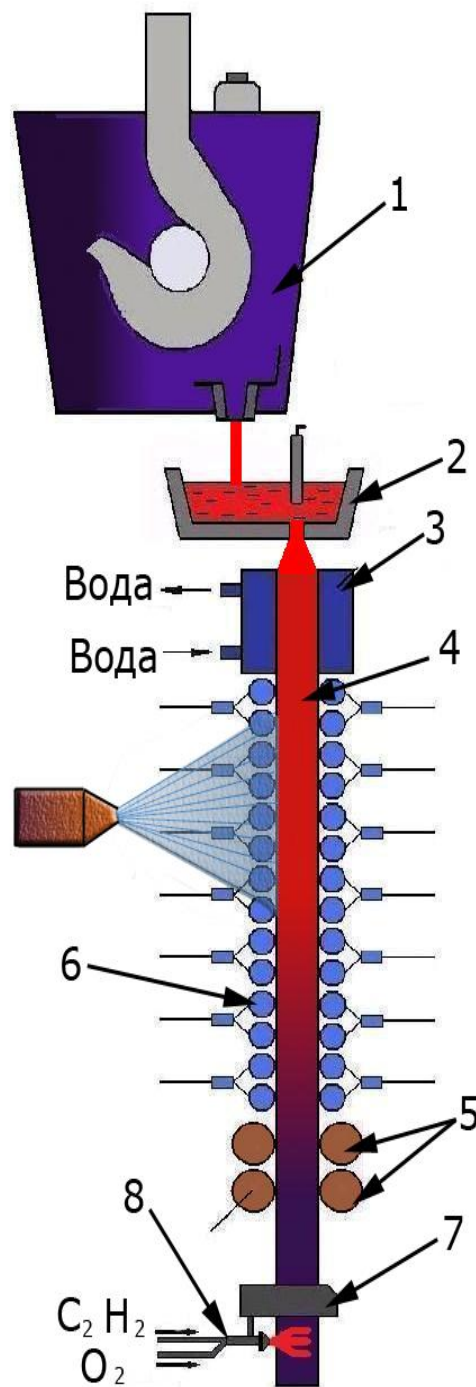


Рис. 1.10. Схема установки для непрерывной разливки стали

Такой же эффект достигается *продувкой стали порошкообразной шлакообразующей смесью*, состоящей из извести и плавикового шпата.

Эффект очистки стали *вакуумированием* основан на уменьшении растворимости газов при снижении давления над зеркалом жидкой стали. Бурно выделяющиеся при этом пузырьки газов увлекают за собой и неметаллические включения. Вакуумирование осуществляют в печи или в ковше, установленных в вакуумных камерах, а также при переливе стали из ковша в ковш.

Эффект повышения качества стали с помощью *повторного переплава* основан на тех же явлениях, что и внепечная обработка жидкой стали, т. е. на очистке жидким шлаком или на явлении вакуумирования. Переплавка ведётся на установках, создающих необходимые условия обработки расплавляемых порций стали. К таким способам относятся: электрошлаковый переплав, переплав в вакуумно-дуговой печи, переплав в электронно-лучевой печи и др.

Эффективность переплава оценивается производительностью процесса и расходом электроэнергии на тонну переплавленной стали. Производительность установок для переплава достигает 300–860 кг/час, а расход электроэнергии составляет от 300 до 450 кВт·ч/т.

Перечисленные способы повышения качества применяют для получения высококачественных сталей и сплавов, а также тугоплавких металлов для деталей ответственного назначения, работающих в тяжёлых условиях эксплуатации.

1.5. Производство цветных металлов

Разделение металлов на чёрные и цветные весьма условно. К цветным относятся медь, алюминий, титан и другие металлы. Они занимают после железа второе место в машиностроении.

1.5.1. Производство меди

Медь по электропроводности уступает лишь серебру и является главным проводником в электро- и радиотехнике, где потребляется 40–50 % выплавляемой меди. Вторая половина меди используется в машиностроении в виде сплавов – латуней и бронз.

Медные руды. Медь встречается в природе главным образом в виде сернистых соединений CuS , Cu_2S и очень редко в виде самородков. Самые распространённые медные руды – это халькопирит (медный колчедан) CuFeS_2 и халькозин (медный блеск) Cu_2S .

Все медные руды являются бедными и обычно содержат 1–2 % Cu. Пустая порода состоит из песчаников (SiO_2), сульфидов железа FeS (пирит) и т. п.

Медные руды являются комплексными полиметаллическими и содержат, кроме меди, ещё никель, цинк, свинец, золото, серебро и другие металлы.

Пирометаллургический способ производства меди

Этот способ является основным, так как он позволяет извлекать из руд попутно с медью другие ценные металлы. Этим способом производят 90 %

всей меди.

Обогащение медных руд производится методом флотации. Сущность флотации заключается в том, что во флотационной машине через пульпу продувают воздух. Пульпа состоит из воды, тонкоизмельченной руды (размер частиц 0,05–0,5 мм) и специальных реагентов, которые образуют на поверхности металлосодержащих частиц плёнку, не смачиваемую водой. К таким частицам легко прилипают пузырьки воздуха. В результате они всплывают на поверхность в виде пены, а пустая порода осаждается на дно. Пену сушат и получают рудный концентрат, содержащий 10–35 % меди.

Обжиг производится в печах кипящего слоя. Необходимая температура 850 °С обеспечивается в результате горения серы. Образующийся сернистый газ SO_2 очищается и направляется на производство серной кислоты. Содержание серы в концентрате снижается вдвое.

Плавка на штейн проводится в пламенных печах, работающих на пылевидном (уголь), жидком или газообразном топливе. При плавке обожжённого концентрата при температуре 1500–1600 °С образуется первичный штейн, состоящий из сульфида меди Cu_2S (20–60 % Cu), сульфида железа FeS (10–60 % Fe) и серы (20–25 %).

Продувка в конвертере. Расплавленный штейн из пламенной печи заливают в конвертер (рис. 1.11) и продувают воздухом. В результате получают черновую медь.

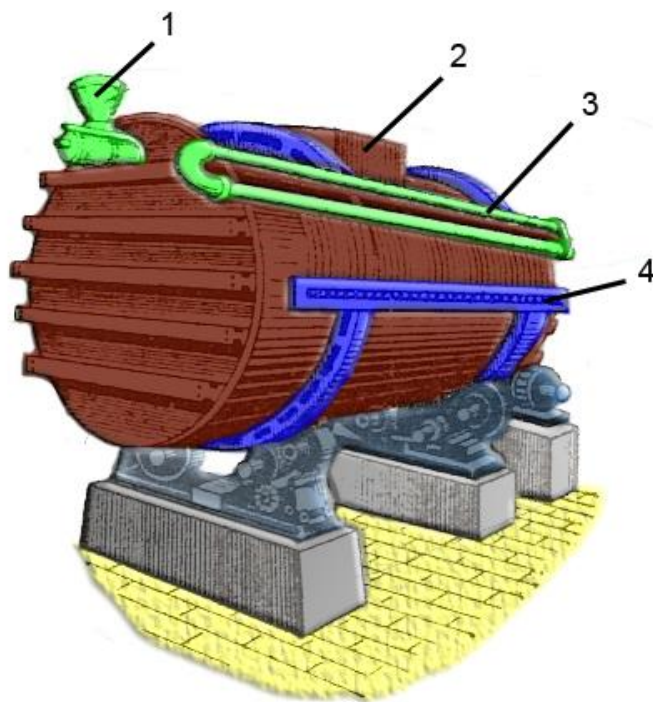


Рис. 1.11. Конвертер для выплавки черновой меди

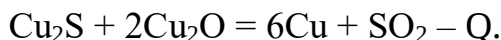
1 – приспособление для ввода флюсов; 2 – горловина; 3 – воздухопровод; 4 – фурмы

Процесс выплавки черновой меди из штейна делится на два периода. В первом периоде удаляется сернистое железо (FeS):



Образуется белый штейн (в отличие от первичного тёмного штейна).

Во втором периоде из белого штейна образуется черновая медь окислением сульфида меди:



Таким образом, в конвертере получают черновую медь МК1, содержащую 99 % Cu, остальное – Fe, Ni, Pb и небольшое количество других примесей (Zn, Sb, Au, Ag).

Рафинирование меди производят сначала огневым, затем электролитическим способом.

Огневое рафинирование ведут в пламенных печах ёмкостью до 400 т. Сущность огневого рафинирования заключается в окислении продувкой воздухом примесей, имеющих большее сродство к кислороду, чем медь, и в удалении их с газами или в шлак (SbO_2 , PbO , ZnO удаляются с газами, а FeO , Al_2O_3 , SiO_2 – в шлак).

Этот период называется окислительным. Au и Ag не окисляются и растворяются в меди. Во второй период (восстановительный) восстанавливается Cu из Cu_2O .

Для этого шлак удаляют. На поверхность ванны засыпают древесный уголь (это предохраняет металл от окисления). Затем производят «дразнение» меди. В расплавленный металл погружают сначала сырые, а затем сухие деревянные шесты. В результате образуются пары воды и газообразные углеводороды (CH_4 и др.), они энергично раскисляют медь:



Готовую медь, содержащую 99,7 % Cu, разливают в слитки для проката или в анодные пластины для электролитического рафинирования.

Электролитическое рафинирование обеспечивает получение более чистой меди и отделение Au и Ag. Электролит – раствор сернокислой меди CuSO_4 и серной кислоты. Анод является пластиной из рафинированной меди. Катод – тонкий лист (0,5–0,7 мм) из электролитической меди. При пропускании постоянного тока (напряжение 2–3 В, плотность тока 100–150 А/м²) анод растворяется в электролите, и медь осаждается на катоде. Примеси золота и серебра выпадают в осадок.

1.5.2. Производство алюминия

Алюминий – наиболее распространённый металл в земной коре. Имеет высокую электропроводность (уступает только серебру и меди). Применяется в электротехнике как проводник. В машиностроении алюминий применяется в виде сплавов, например, дуралюмин (Al + Cu) – в самолетостроении, силумин (Al + Si) – в автостроении.

Основное сырьё для получения алюминия – алюминиевые руды: бокситы, нефелины, алуниты и каолины. Наибольшее значение имеют бокситы.

Современное производство алюминия состоит из двух основных процессов: получение глинозёма Al_2O_3 из алюминиевых руд и получение алюминия путем электролиза расплавленного глинозёма. Электролитом при этом служит расплавленный криолит Na_3AlF_6 .

Получение *глинозёма* щелочным способом заключается в обработке мелкоразмолотой руды (боксита) щёлочью (раствором едкого натрия $NaOH$) в автоклавах при температуре $250\text{ }^{\circ}C$. При этом пустая порода выпадает в осадок, а раствор алюмината $NaAlO_2$ подвергается операции выкручивания с целью получения гидроокиси алюминия $Al(OH)_3$.

Кристаллическую гидроокись обжигают в трубчатых печах при температуре $1200\text{ }^{\circ}C$ для обезвоживания. Гидроокись, теряя воду, превращается в чистый глинозём Al_2O_3 :



Параллельно с получением глинозёма идет производство *криолита* Na_3AlF_6 , необходимого для осуществления второй стадии получения алюминия – *электролиза*.

Глинозём и криолит подаются в электролизную ванну (рис. 1.12).

Электролизная ванна представляет собой металлический кожух 1, выложенный изнутри теплоизоляционной футеровкой 2. Подина и стены ванны составлены из углеродистых блоков 3. Нижние блоки имеют каналы, в которых проходят катодные шины 5. Аноды представляют собой углеродистые блоки 4, подвешенные на анодных стержнях. Свободными концами аноды опущены в электролит (расплав криолита).

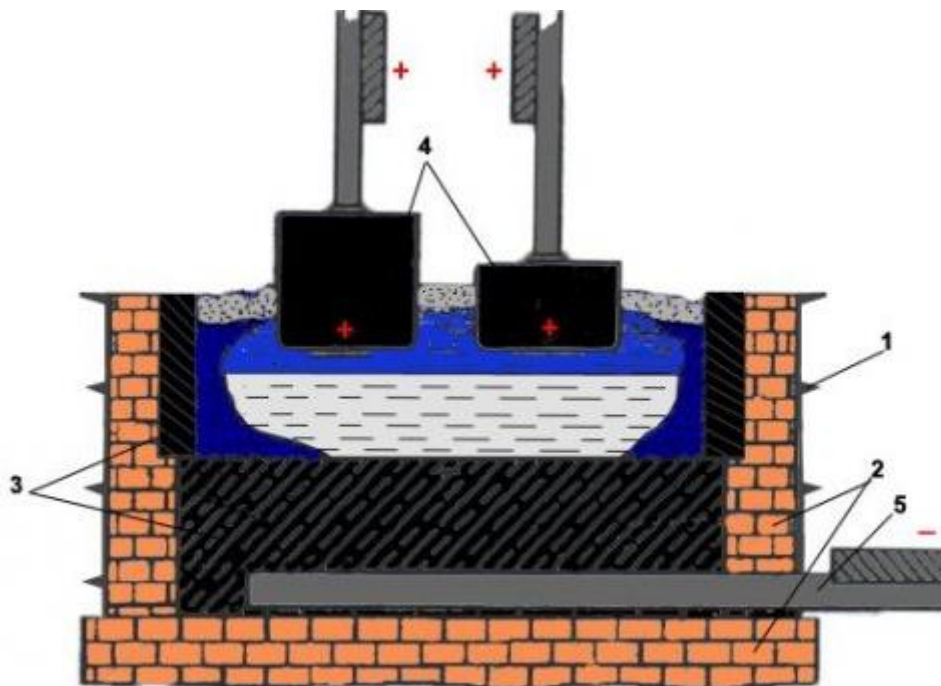


Рис. 1.12. Ванна для электролиза алюминия

Электролизу подвергается раствор глинозёма в расплавленном криоли-

те при напряжении 4–4,5 В и плотности тока 0,7–1,2 А/см². В расплавленном криолите происходит диссоциация молекул глинозёма:



Катионы алюминия Al^{3+} , разряжаясь на катоде, превращаются в металлический алюминий, который скапливается на дне электролизной ванны и периодически отбирается вакуумным ковшом.

Полученный электролизом первичный алюминий подвергают рафинированию для удаления газов и примесей (железа, кремния и др.). С этой целью алюминий в печи или в ковше продувают газообразным хлором и отстаивают 30–45 минут. Для получения алюминия более высокой чистоты его подвергают электролитическому рафинированию.

Технико-экономические показатели производства алюминия характеризуют *производительность, затраты электроэнергии и вспомогательных материалов*.

На получение 1 т алюминия затрачивается 2 т глинозёма, 0,1 т криолита, до 0,6 т угольных анодов и 16500–18500 кВт·ч электроэнергии.

1.6. Порошковая металлургия

Сущность **порошковой металлургии** заключается в том, что из металлического порошка прессуют заготовку, которую затем подвергают спеканию для придания прочности. Металлические порошки состоят из очень мелких частиц (0,5–500 мкм) различных металлов и их окислов.

Операции технологического процесса получения изделий из металлических порошков можно представить в виде следующей схемы:

- 1) производство порошков металлов и других материалов;
- 2) приготовление смеси (смешивание порошков, введение технологических добавок);
- 3) получение промежуточного продукта: формование заготовки из порошка со связкой или без неё путем прессования или прокатки;
- 4) получение прочных изделий (спекание заготовки);
- 5) дополнительная обработка спечённого изделия (механическая обработка, пропитка, термообработка, нанесение покрытий).

Производство порошков возможно механическими или физико-химическими методами (табл. 1.1).

При **приготовлении смеси** в металлический порошок вводят различные присадки: пластификаторы (парафин, стеарин и др., облегчающие процесс прессования и формообразования), легкоплавкие присадки (легкоплавкие металлы), различные летучие вещества для получения деталей с заданной пористостью.

Формование заготовок и деталей осуществляют прессованием (одностороннее, двухстороннее, гидростатическое прессование) на механических и гидравлических прессах или прокаткой на прокатных станах.

Спекание проводят для повышения прочности предварительно полу-

ченных прессованием или прокаткой заготовок. Температура спекания составляет 0,7–0,9 абсолютной температуры плавления наиболее легкоплавкого компонента порошковой смеси. Это так называемое *твердофазное спекание*. Для получения более плотных изделий применяют *жидкофазное спекание*, при котором легкоплавкий компонент расплавляется и пропитывает смесь, скрепляя её. Для спекания используют электрические печи сопротивления или печи с индукционным нагревом. Для предотвращения окисления спекают в нейтральных или защитных средах.

Таблица 1.1

Методы получения металлических порошков

Метод	Характеристика метода	Материалы	Форма и размер частиц, мкм	Примечание
Механические методы				
Размол в шаровых мельницах	Диаметр барабана 250–1500 мм, скорость вращения 30–120 об/мин	Чёрные и цветные металлы	Неправильный многогранник, 100–1000	Порошки загрязняются продуктами истирания шаров
Размол в вихревых мельницах	Скорость вращения пропеллера 3000 об/мин	Fe, Cu, Al, Ag, Ti и их сплавы	Пластины, 50–200	Можно размалывать отходы металлообрабатывающей промышленности
Грануляция	Заливка в воду тонкой струёй	Чугун, медь, свинец и др.	Сфероид, 100–300	Применяют для спекания пористых изделий
Виброизмельчение	1400–1500 колебаний/мин	Хрупкие карбиды, окислы металлов	Неправильный многогранник, 20–60	Износостойкие, твёрдые изделия
Физико-химические методы				
Восстановление из оксидов	Восстановители: углерод и водород	Fe, W, Ti, Mo, Ni, Co и др.	Неправильный многогранник, 50–200	Наиболее дешёвый метод. Полученная губка разваливается
Электролиз	Осаждение порошка при электролизе солей металлов	Чистые и редкие металлы	1–100	Можно получать порошки из загрязнённых металлов
Карбонильный способ	При 200–300 °С карбонил распадается на порошок металла и оксид углерода	Fe, Ni, Co	Сфероид, 1–800	—
Восстановление гидратом кальция	Химическая реакция	Хром	Дендрит, 8–20	Известь вымывается водой

Заключительные операции применяют в случае необходимости. Обработку резанием применяют в тех случаях, когда прессованием нельзя получить детали заданных размеров и форм. При обработке пористых заготовок нельзя применять охлаждающие жидкости, так как они впитываются в поры и вызывают коррозию. Пропитывать маслом пористые заготовки перед обработкой резанием также нельзя, так как за счёт тепловыделения при резании масло начинает выгорать, задымляя рабочую зону.

При обработке резанием применяют твердосплавный или алмазный инструмент. Для сохранения пористости инструмент должен быть хорошо заточен и подвергнут отделочной обработке (доводке).

Изделия, полученные методом порошковой металлургии, поставляются в виде полуфабрикатов (листов, прутков) или готовых изделий.

Большое применение находят порошковые материалы со специальными свойствами.

Антифрикционные металлокерамические материалы применяются для изготовления подшипников скольжения с пористостью 10–35 %. Имеют твёрдую металлическую основу с порами, заполненными маслом или графитом. Для пористых антифрикционных материалов используют железо-графитовые, железо-медно-графитовые, бронзо-графитовые и т. п. композиции.

Фрикционные материалы обладают высоким коэффициентом трения и используются для изготовления тормозных накладок. Коэффициент трения можно повысить добавкой асбеста, карбидов тугоплавких металлов и окислов.

Из **высокопористых материалов** изготавливают фильтры с пористостью до 50 %. Для фильтров применяют порошки нержавеющей стали, алюминия, титана.

Высокопористые материалы изготавливают без прессования, одним спеканием, или прокаткой при производстве пористой ленты.

Металлокерамические твёрдые сплавы применяются для изготовления режущего и бурового инструмента. Основой для изготовления твёрдых сплавов являются порошки карбидов тугоплавких металлов (WC, TiC, TaC). В качестве связующего вещества применяют кобальт. Наибольшей твёрдостью характеризуются материалы на основе кубического нитрида бора (эльбор). При изготовлении алмазного инструмента для связки алмазных порошков применяют металлические порошки (медные, никелевые и др.).

Из **жаропрочных** и **жаростойких материалов** изготавливают детали, работающие при высоких температурах (порошки на основе Ni, Ti, W, Ta).

Преимущества порошковой металлургии

Себестоимость порошковых материалов намного выше стоимости традиционных материалов; применение ограничивается также возможностью изготовления только изделий простой формы. Но порошковая металлургия позволяет получать материалы и изделия с такими составами, структурами и свойствами, какие невозможно получить традиционными металлургическими

методами. Существенным достоинством порошковой металлургии является также её безотходность и экологическая чистота. Экономическая эффективность изготовления деталей из порошков тем больше, чем больше серийность. В серийном производстве – например, в авиастроении – широко применяются спечённые конструкционные детали.