

Рис. 2.9. Схема строения стальных слитков

ния *Г* — мелкокристаллическую зону у донной части слитка. Стальные слитки неоднородны по химическому составу. Химическая неоднородность, или ликвация, возникает вследствие уменьшения растворимости примесей в железе при его переходе из жидкого состояния в твердое. Ликвация бывает двух видов — дендритная и зональная.

Дендритная ликвация — неоднородность стали в пределах одного кристалла (дендрита) — центральной оси и ветвей. Например, при кристаллизации стали содержание серы на границах дендрита по сравнению с содержанием в центре увеличивается в 2 раза, фосфора — в 1,2 раза, а углерода уменьшается почти на половину.

Зональная ликвация — неоднородность состава стали в различных частях слитка. В верхней части слитка из-за конвекции жидкого металла содержание серы, фосфора и углерода увеличивается в несколько раз (рис. 2.9, *в*), а в нижней части — уменьшается. Зональная ликвация приводит к отбраковке металла вследствие отклонения его свойств от заданных. Поэтому прибыльную и подперибыльную части слитка, а также донную его часть при прокатке отрезают.

В слитках кипящей стали (рис. 2.9, *б, в*) не образуется усадочная раковина: усадка стали распередоточена по полостям газовых

пузырей, возникающих при кипении стали в изложнице. При прокатке слитка газовые пузыри завариваются. Кипение стали влияет на зональную ликвацию в слитках, которая развита в них больше, чем в слитках спокойной стали. Углерод, сера и фосфор потоком металла выносятся в верхнюю часть слитка, от чего свойства стали в этой части слитка ухудшаются. Поэтому при прокатке отрезают только верхнюю часть слитка, так как в донной ликвация мала. Для уменьшения ликвации кипение после заполнения изложницы прекращают, накрывая слиток металлической крышкой («механическое закупоривание»), либо раскисляют металл алюминием или ферросилицием в верхней части слитка («химическое закупоривание»).

Слиток кипящей стали имеет следующее строение (рис. 2.9, *б, в*): плотную наружную корку *А* без пузырей, из мелких кристаллитов, зону соевых пузырей *В*, вытянутых к оси слитка и располагающихся между кристаллитами *Б*, зону *В* неориентированных кристаллитов, промежуточную плотную зону *С*, зону вторичных круглых пузырей *К* и среднюю зону *Д* с отделившимися пузырями, которых больше в верхней части слитка. Полуспокойная сталь сохраняет преимущества спокойной и кипящей стали и не имеет их недостатков.

**Полуспокойная сталь** (рис. 2.9, *б, в*) частично раскисляется в печи и ковше, а частично — в изложнице. Слиток полуспокойной стали имеет в нижней части структуру спокойной стали, а в верхней — кипящей. Ликвация в верхней части слитков полуспокойной стали меньше, чем у кипящей, и близка к ликвации спокойной стали, но слитки полуспокойной стали не имеют усадочной раковины.

### 7. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА МЕТАЛЛА

Развитие машиностроения и приборостроения предъявляет возрастающие требования к качеству металла: его прочности, пластичности, газосодержанию. Улучшить эти показатели можно уменьшением в металле вредных примесей, газов, неметаллических включений. Для повышения качества металла используют обработку металла синтетическим шлаком, вакуумную дегазацию металла, плавку в вакуумных печах, электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумно-дуговой переплав (ВДП), вакуумно-индукционный переплав (ВИП), переплав металла в электроно-лучевых и плазменных печах.

**Обработка металла синтетическим шлаком** заключается в следующем. Синтетический шлак, состоящий из 55% CaO, 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, небольшого количества SiO<sub>2</sub>, MnO и минимума FeO, выплавляют в электропечи и заливают в ковш. В этот же ковш затем заливают сталь. При перемешивании стали и шлака поверхность их взаимодельствия резко возрастает и реакции между ними протекают гораздо быстрее, чем в плавильной печи. Благодаря этому, а также низкому содержанию оксида железа в шлаке сталь, обработанная таким способом, содержит меньше серы, кислорода и неметаллических

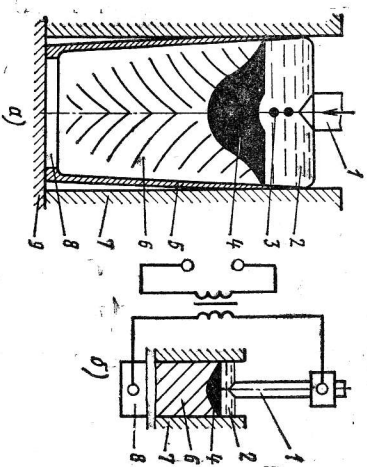


Рис. 2.10. Схема электрошлакового переплава расходного электрода:  
 6 — кристаллизатор; 6 — включение установки

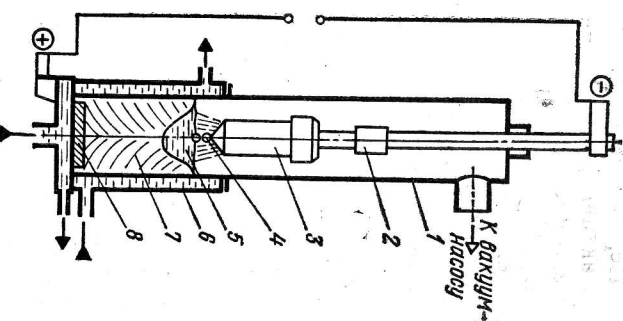


Рис. 2.11. Схема вакуумно-дугового переплава

включений, улучшается ее пластичность и прочность. Также стали применяют для изготовления ответственных деталей машин.

**Вакуумную дегазацию стали** проводят для уменьшения содержания в металле газов и неметаллических включений. Вакуумирование стали производят в ковше, при переливе из ковша в ковш, при заливке в изложницу и т. п. Для вакуумирования в ковше ковш с жидкой сталью помещают в камеру, закрывающуюся герметичной крышкой. Вакуумными насосами в камере создается разрежение до остаточного давления 0,267—0,667 кПа. При понижении давления из жидкой стали выделяется водород и азот. Выливающие пузырьки газов захватывают неметаллические включения, в результате чего содержание их в стали снижается. Все это улучшает прочность и пластичность стали.

**Электрошлаковый переплав (ЭШП)** разработан в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Переплаву подвергают выплавленный в дуговой печи и прокатанный на круглые прутки металл. Исходным теллотом при ЭШП является шлаковая ванна, нагреваемая при прохождении через нее электрического тока. Электрический ток подводится к переплавляемому электроду 1, погруженному в шлаковую ванну 2 и к подлону 9, установленному в водоохлаждаемом металлургическом кристаллизаторе 7, в котором находится заготовка 8 (рис. 2.10). Выделяющаяся в шлаковой ванне 2 теллота нагревает ее до температуры 1700 °С и выжигает оплавление конца электрода. Капли жидкого металла 3 проходят через шлак, образуя под шлаковым слоем металлургическую ванну 4.

Перенос капель металла через основной шлак способствует неактивному взаимодействию, удалению из металла серы. Неметаллических включений и растворенных газов. Металлическая ванна непрерывно пополняется путем расплавления электрода, под действием кристаллизатора постепенно формируется в слиток 6. Последовательная и направленная кристаллизация способствует удалению из металла неметаллических включений и газа, получение плотного однородного слитка.

В результате ЭШП содержание кислорода в металле снижается в 1,5—2 раза, понижается концентрация серы, в 2—3 раза уменьшается содержание неметаллических включений, они становятся мельче и равномерно распределяются в объеме слитка. Слиток отличается плотностью, однородностью, хорошим качеством поверхности благодаря наличию шлаковой корочки 5, высокими механическими и эксплуатационными свойствами стали и сплавов. Слитки выливают круглого, квадратного, прямоугольного сечения массой до 110 т. Наиболее широко ЭШП используют при выплавке высококачественных сталей для шарикоподшипников, жаропрочных сталей для дисков и лопаток турбин, валов компрессоров, авиационных конструкций.

**Вакуумно-дуговой переплав (ВДП)** применяют в целях удаления из металла газов и неметаллических включений. Процесс осуществляют в вакуумных дуговых печах с расходным электродом (рис. 2.11). В зависимости от требований, предъявляемых к получаемому металлу, расходный электрод изготавливают механической обработкой слитка, выплавленного в электропечах или установкой как ЭШП. Расходный электрод 3 закрепляют на водоохлаждаемом штоте 2 и помещают в корпус 1 печи и далее в медную водоохлаждаемую изложницу 6. Из корпуса печи откачивают воздух до остаточного давления 0,00133 кПа.

При подаче напряжения между расходным электродом-катодом 3 и заправкой-анодом 8 возникает дуга. Выделяющаяся теллота расплавляет концы электрода; капли 4 жидкого металла, проходя зону дугового разряда, дегазируются, заполняют изложницу и затвердевают, образуя слиток 7. Дуга горит между расходным электродом и жидким металлом 5 в верхней части слитка на протяжении всей плавки. Сильное охлаждение слитка и разогрев дуговой ванны металла создают условия для направленного затвердевания слитка, вследствие чего неметаллические включения сосредоточиваются в верхней части слитка, а усадочная раковина в слитке мала. Слитки ВДП содержат мало газов, неметаллических включений, отличаются высокой равномерностью химического состава, повышенными механическими свойствами. Из слитков изготавливают ответственные детали турбин, двигателей, авиационных конструкций. Масса слитков достигает 50 т.

Плавку в электропечи применяют для получения чистых и ультрачистых тугоплавких металлов (молибдена, ниобия, циркония и др.), для выплавки специальных сплавов и сталей. Исходным теллотом в этих печах является энергия, выделяющаяся при торможении свободных электронов. Пучок которых направлен

на металл. Полученные электроны, их разгон, концентрация в луч, направление луча в зону плавления осуществляются электронной пушкой. Металл плавится и затвердевает в водоохлаждаемых кристаллизаторах при остаточном давлении  $1,33 \cdot 10^{-3}$  кПа. Вакуум внутри печи, большой перегрев и высокая скорость охлаждения сглатка способствуют удалению газов и примесей, получение металла особо высокого качества. Однако при переплаве шихты, содержащей легкоиспаряющиеся элементы, изменяется химический состав металла.

Плавку стали в плазменно-дуговых печах применяют для получения высококачественных сталей и сплавов. Источники теплоты в этих печах — низкотемпературная плазма ( $30\,000^\circ\text{C}$ ), получаемая в плазменных горелках. В этих печах можно создавать нейтральную среду заданного состава (аргон, гелий). Плазменно-дуговые печи позволяют быстро расплавить шихту, а в нейтральной газовой среде происходит дегазация выплавляемого металла, легкоиспаряющиеся элементы, входящие в его состав, не испаряются.

## ГЛАВА IV. ПРОИЗВОДСТВО ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

### 1. ПРОИЗВОДСТВО МЕДИ

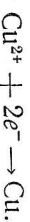
Для производства меди применяют **медные руды**, содержащие  $1-6\%$  Cu, а также **отходы меди** и ее сплавов. В рудах медь обычно находится в виде сернистых соединений ( $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuS}$ ), оксидов ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO}$ ) или гидроксидов ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2$ ,  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ,  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ). Перед плавкой медные руды обогащают и получают концентрат. Для уменьшения содержания серы в концентрате его подвергают окислительному обжигу при температуре  $750-800^\circ\text{C}$ .

**При пирометаллургическом способе** полученный концентрат переплавляют в отражательных или электрических печах. При температуре  $1250-1300^\circ\text{C}$  восстанавливаются оксид меди ( $\text{CuO}$ ) и высшие оксиды железа. Образующийся оксид меди ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), реагируя с  $\text{FeS}$ , дает  $\text{Cu}_2\text{S}$ . Сульфиды меди и железа растворяются и образуют штейн, а растворенные силикаты железа растворяют другие оксиды и образуют шлак. Затем расплавленный медный штейн заливают в конвертеры и продувают воздухом (конвертеры) для окисления сульфидов меди и железа, перевода образующихся оксидов железа в шлак, а серы в  $\text{SO}_2$  и получения черновой меди. Черновая медь содержит  $98,4-99,4\%$  Cu и небольшое количество примесей. Эту медь разливают в изложницы.

Черновую медь рафинируют для удаления вредных примесей и газов. Сначала производят огневое рафинирование в отражательных печах. Примеси S, Fe, Ni, As, Sb и другие окисляются кислородом воздуха, подаваемым по стальным трубкам, погруженным в расплавленную черновую медь. Затем удаляют газы, для чего снимают шлак и погружают в медь сырое дерево. Пары воды перемешивают медь и способствуют удалению  $\text{SO}_2$  и других газов. При этом медь окисляется и для освобождения ее от  $\text{Cu}_2\text{O}$  ванну жидкой меди покрывают древесным углем и погружают в нее деревянные жерди. При сухой перетонке древесины, погруженной в медь, образуются углеводороды, которые восстанавливают Cu<sub>2</sub>O.

После огневого рафинирования получают медь чистой  $99-99,5\%$ . Из нее отливают чушки для выплавки сплавов меди (бронзы и латуни) или плиты для электролитического рафинирования.

Электролитический процесс рафинирования меди осуществляют для получения чистой от примесей меди ( $99,95\%$  Cu). Электролиз ведут в ваннах, покрытых изнутри винилластом или свинцом. Аноды делают из меди огневого рафинирования, а катоды — из листов чистой меди. Электролитом служит водный раствор  $\text{CuSO}_4$  ( $10-16\%$ ) и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ( $10-16\%$ ). При пропускании постоянного тока анод растворяется, медь переходит в раствор, а на катодах разряжаются ионы меди:



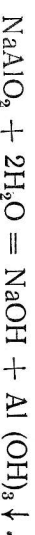
Примеси (мышьяк, сурьма, висмут и др.) осаждаются на дно ванны, их удаляют и перерабатывают для извлечения этих металлов. Катоды выгружают, промывают и переплавляют в электропечи.

### 2. ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЯ

Основное сырье для производства алюминия — **алюминиевые руды**: бокситы, нефелины, алуниты, каолины. Наибольшее значение имеют бокситы. Алюминий в них содержится в виде минералов — гидроксидов  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{AlOОН}$ , корунда  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и каолинита  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Алюминий получают электролизом глинозема — окиси алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) в расплавленном криолите ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) с добавлением фтористых алюминия и натрия ( $\text{AlF}_3$ ,  $\text{NaF}$ ). Производство алюминия включает получение безводного, свободного от примесей оксида алюминия (глинозема); получение криолита из плавленого шпата; электролиз глинозема в расплавленном криолите. Глинозем получают из бокситов путем их обработки щелочью:



Полученный алюминат натрия  $\text{NaAlO}_2$  подвергают гидролизу:



В результате в осадок выпадают кристаллы гидроксида алюминия  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . Гидроксид алюминия обезвоживают во вращающихся печах при температуре  $1150-1200^\circ\text{C}$  и получают обезвоженный глинозем  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для производства криолита сначала из плавикового шпата получают фтористый водород, а затем плавиковую кислоту. В раствор плавиковой кислоты вводят  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , в результате чего образуется фторалюминиевая кислота, которую нейтрализуют содой и получают криолит, выпадающий в осадок:



Его отфильтровывают и просушивают в сушильных барабанах.

Электродлизиона  $Al_2O_3$  проводят в электролизере, в котором имеется ванна из углеродистого материала. В ванне слоем 250—300 мм находится расплавленный алюминий, служащий катодом, и жидкий криолит.

Анодное устройство состоит из угольного анода, погруженного в электролит. Постоянный ток силой 70—75 кА и напряжением 4—4,5 В подводится для электролиза и разогрева электролита до температуры 1000 °С.

Электролит состоит из криолита, глинозема,  $AlF_3$  и  $NaF$ . Криолит и глинозем в электролите диссоциируют; на катоде разряжается ион  $Al^{3+}$  и образуется алюминий, а на аноде — ион  $O^{2-}$ , который окисляет углерод анода до  $CO$  и  $CO_2$ , удаляющихся из ванны через вентиляционную систему. Алюминий собирается на дне ванны под слоем электролита. Его периодически извлекают, используя специальную установку. Для нормальной работы ванны на ее дне оставляют немного алюминия.

Алюминий, полученный электролизом, называют алюминиевым сырьем. В нем содержатся металлические и неметаллические примеси, газы. Примеси удаляют рафинированием, для чего продавают хлор через расплав алюминия. Образующийся паробразный хлористый алюминий, проходя через расплавленный металл, обволакивает частички примесей, которые всплывают на поверхность металла, и их удаляют. Хлорирование алюминия способствует также удалению  $Na$ ,  $Ca$ ,  $Mg$  и газов, растворенных в алюминии.

Затем жидкий алюминий выдерживают в ковше или электропечи в течение 30—45 мин при температуре 690—730 °С для выплавки неметаллических включений и выделения газов из металла. После рафинирования чистота первичного алюминия составляет 99,5—99,85 %.

### 3. ПРОИЗВОДСТВО МАГНИЯ

Подобно алюминию магний получают электролизом из его расплавленных солей.

Основным сырьем для получения магния являются карналлит ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ), магнезит ( $MgCO_3$ ), доломит ( $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ ), бишофит ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ). Наибольшее количество магния получают из карналлита. Сначала карналлит обогащают и обезвоживают. Безводный карналлит ( $MgCl_2 \cdot 2H_2O$ ) используют для приготовления электролита.

Электролиз осуществляют в электролизере, футерованном шамотным кирпичом. Анодами служат графитовые пластины, а катодами — стальные пластины. Электролизер заполняют расплавленным электролитом состава: 10 %  $MgCl_2$ , 45 %  $CaCl_2$ , 30 %  $NaCl$ , 15 %  $KCl$  с небольшими добавками  $NaF$  и  $CaF_2$ . Такой состав электролита необходим для понижения температуры его плавления ( $720 \pm 10$  °С). Для электролитического разложения хлористого магния через электролит пропускают ток. В результате образуются ионы хлора, которые движутся к аноду. Ионы магния движутся к катоду и после

разряда выделяются на поверхности, образуя капельки жидкого черного магния. Магний имеет меньшую плотность, чем электролит, поэтому он всплывает на поверхность, откуда его периодически удаляют вакуумным ковшом.

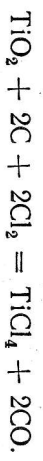
Черновой магний содержит 5 % примесей, поэтому его рафинируют переплавкой с флюсами. Для этого черновой магний и флюс, состоящий из  $MgCl_2$ ,  $KCl$ ,  $BaCl_2$ ,  $CaF_2$ ,  $NaCl$ ,  $CaCl_2$ , нагревают в электропечи до температуры 700—750 °С и перемешивают. При этом неметаллические примеси переходят в шлак. После этого печь охлаждают до температуры 670 °С и магний разливают в изложницы на чушки.

### 4. ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНА

Сырьем для получения титана являются титано-магнетитовые руды, из которых выделяют ильменитовый концентрат, содержащий 40—45 %  $TiO_2$ , ~30 %  $FeO$ , 20 %  $Fe_2O_3$  и 5—7 % пустой породы. Название этот концентрат получили по наличию в нем минерала ильменита  $FeO \cdot TiO_2$ .

Ильменитовый концентрат плавят в смеси с древесным углем, антрацитом в руднотермических печах, где оксиды железа и титана восстанавливаются. Образующееся железо науглероживается, и получают сырец чулун, а низшие оксиды титана переходят в шлак. Чулун и шлак разливают отдельно в изложницы. Основной продукт этого процесса — титановый шлак содержит 80—90 %  $TiO_2$ , 2—5 %  $FeO$  и примеси —  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$  и др. Побочный продукт этого процесса — чулун — используют в металлургическом производстве.

Полученный титановый шлак подвешивают в электропечи и рафинируют в специальных печах. В нижней части печи расплавляют угольную засадку, нагревающуюся при пропускании через нее электрического тока. В печь подают брикеты титанового шлака, а через фурмы внутрь печи — хлор. При температуре 800—1250 °С в присутствии углерода образуется четыреххлористый титан, а также хлориды  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$  и др.:



Четыреххлористый титан отделяется и очищается от остальных хлоридов благодаря различию температуры кипения этих хлоридов методом ректификации в специальных установках.

Титан из четыреххлористого титана востанавливают в реакторе аргоном внутри его подают паробразный четыреххлористый титан. Между жидким магнием и четыреххлористым титаном происходит реакция:



Твердые частицы титана спекаются в пористую массу — губку, а жидкий  $MgCl_2$  выпускают через легкую реактора. Губка титана содержит 35—40 % магния и хлористого магния. Для удаления из титановой губки этих примесей ее нагревают до температуры 900—950 °С в вакууме.

Титановую губку плавят методом вакуумно-дугового переплава (см. с. 47). Вакуум в печи предохраняет титан от окисления и способствует очистке его от примесей. Полученные слитки титана имеют дефекты, поэтому их вторично переплавляют, используя как расходимые электроды. После этого чистота титана составляет 99,6—99,7 %. После вторичного переплава слитки используют для обработки давлением.

## РАЗДЕЛ 3

### ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

#### ГЛАВА I. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

##### 1. СУЩНОСТЬ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Обработка металлов давлением основана на их способности в определенных условиях пластически деформироваться в результате воздействия на деформируемое тело (заготовку) внешних сил.

Если при упругих деформациях деформируемое тело полностью восстанавливает исходные форму и размеры после снятия внешних сил, то при пластических деформациях изменение формы и размеров, вызванное действием внешних сил, сохраняется и после прекращения действия этих сил. Упругая деформация характеризуется смещением атомов относительно друг друга на величину, меньшую межатомных расстояний, и после снятия внешних сил атомы возвращаются в исходное положение. При пластических деформациях атомы смещаются относительно друг друга на величину, большую межатомных расстояний, и после снятия внешних сил не возвращаются в свое исходное положение, а занимают новые положения равновесия.

Для начала перехода атомов в новые положения равновесия необходима определенная величина действующих напряжений, зависящая от межатомных сил и характера взаимного расположения атомов (типа кристаллической решетки, наличия и расположения примесей, формы и размеров зерен поликристалла и т. п.).

Так как сопротивление смещению атомов в новые положения изменяется не пропорционально смещению, то при пластических деформациях линейная связь между напряжениями и деформациями обычно отсутствует.

Напряжения, вызывающие смещение атомов в новые положения равновесия, могут уравниваться только силами межатомных взаимодействий. Поэтому под нагрузкой при пластическом деформировании деформация состоит из упругой и пластической составляющих, причем упругая составляющая исчезает при разгрузке (при снятии деформирующих сил), а пластическая составляющая приводит к остаточному изменению формы и размеров тела. В новые положения равновесия атомы могут переходить в результате смещения в определенных параллельных плоскостях, без существенного изменения расстояний между этими плоскостями. При этом атомы не выходят из зоны силового взаимодействия и деформация происходит без нарушения сплошности металла, плотность которого практически