

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. академика С. П. КОРОЛЕВА

Р. Заббаров, Г. Г. Москвичёв

ПРОГРЕССИВНЫЕ
ПРОЦЕССЫ ВЫПЛАВКИ
И ЛИТЬЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ
В АВИАСТРОЕНИИ

*Утверждено редакционно-издательским
советом института
в качестве учебного пособия*

Заббаров Р., Москвичев Г. Г. **Прогрессивные процессы выплавки и литья сталей и сплавов в авиастроении.** — Куйбышев, Куйбышевский авиационный институт, 1984, 75 с.

В пособии приведены основные сведения о прогрессивных процессах выплавки и литья в авиастроении. Рассмотрены физико-химические процессы при плавке в вакууме, способы получения сталей и сплавов ответственного назначения, закономерности процессов непрерывного литья и направленной кристаллизации, особенности выплавки никелевых, алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Изложены технологические процессы изготовления кузнечно-прессового инструмента, охлаждаемых турбинных лопаток, алюминиевых слитков в ЭМК, сложных фасонных отливок и слитков из титановых сплавов.

Пособие рассчитано на студентов специальности 0408 для изучения курсов «Металлургия и литейное производство в авиастроении» и «Технология изготовления и эксплуатация деформирующего инструмента в процессах ОМД», а также на инженерно-технических работников металлургической специальности.

Ил. 38, табл. 9, библи. 21 назв.

Рецензенты: член-корр. АН СССР И. Н. Фридляндер, Ю. Н. Пименов, А. В. Синельников

ПРЕДИСЛОВИЕ

В последнее время в авиационной отрасли начали широко применяться прогрессивные процессы выплавки и литья, которые пока не нашли отражения в имеющейся учебной литературе. Так, практически отсутствует систематическое изложение таких процессов, как изготовление турбинных лопаток по методу направленной кристаллизации, алюминиевых слитков в ЭМК, сложных фасонных отливок и слитков из титановых сплавов и др. В связи с этим в пособии авторы поставили задачу рассмотреть прогрессивные технологические процессы выплавки и литья, позволяющие обеспечить выпуск высококачественных изделий ответственного авиационного назначения.

В главах 1 и 2 рассмотрены физико-химические процессы при плавке в вакууме, откачные устройства и вакуумные печи, а также вакуумное точное литье жаропрочных сталей и сплавов. Подробно представлены способы получения сталей и сплавов ответственного назначения (глава 3).

Впервые в учебной литературе изложены методы направленной кристаллизации и применение их для производства турбинных охлаждаемых лопаток (глава 4), технологические процессы изготовления литого кузнечно-прессового инструмента (глава 5).

Особенностям плавки цветных металлов посвящена глава 6. Впервые рассмотрены закономерности и технологические особенности изготовления алюминиевых слитков в ЭМК и производство сложных фасонных отливок и слитков из титановых сплавов.

Приведенные в пособии процессы выплавки и литья позволяют в какой-то мере восполнить пробел, имеющийся в учебной литературе.

Глава I. ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ В ВАКУУМЕ

1. СТАЛИ И СПЛАВЫ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Наиболее существенной проблемой на пути развития авиации, космической и реактивной техники является проблема материалов, работающих в области высоких температур. Скорость летательного аппарата ограничивается не только механикой полета, но и стойкостью применяемых материалов. С ростом скорости самолета возникла проблема аэродинамического нагрева конструкций. Вначале она решалась применением высокопрочных алюминиевых сплавов.

В настоящее время конструкция планера самолета дозвуковых скоростей изготавливается примерно из 65% алюминиевых сплавов, 20% стали и остальное — из других материалов (по массе). По данным специалистов США в 80-х годах планер дозвукового самолета будет изготавливаться из 44% алюминиевых сплавов, 15% титановых сплавов, 25% армированных пластиков и 16% — прочных материалов. Таким образом, пределом эффективного применения титана в этих конструкциях является 15%. Однако алюминий продолжает оставаться главным металлом в авиастроении. 3/4 доли всех материалов, применяемых в конструкциях самолетов Ил-62, Ту-134 и др., приходится на алюминиевые сплавы. Алюминиевые сплавы составляют основу конструкции самолетов АН-22 («Антей») и Ту-144.

Полеты со сверхзвуковыми скоростями приводят к значительному аэродинамическому нагреву и нагреву от силовой установки. Применение титана позволило достичь скорости, в 2—3 раза превышающей скорость звука. Таким образом, для самолетов сверхзвуковых скоростей (более 2М) алюминий теряет свое значение и уступает титану.

В табл. 1 приведены примеры применения титановых сплавов в самолетостроении США.

Таблица 1

Примеры применения титановых сплавов

Наименование самолета (вертолета)	Скорость в числах М	Количество титана в % от массы планера
Вертолет СН53А	< 1М	8,50
Истребитель <i>FB-4</i>	~ 2М	8,68
Истребитель <i>F-4H</i>	2,2М	9,69
Истребитель <i>F-14</i>	2,5М	30,00
Разведчик <i>YF-12</i>	> 3М	95,00
Лайнер <i>B-747</i>	< 1М	4,25
Лайнер 2707	2,7М	90,00
Истребитель <i>F-111</i>	2,5М	6,40
Транспортный <i>C-5A</i>	< 1М	20,00

Из титановых сплавов изготавливаются каркас, наружная и внутренняя обшивка, детали ракет и космических кораблей. Сверхзвуковой лайнер «Боинг-733» изготовлен полностью из титана и его сплавов. Широко применялся титан в космических кораблях «Аполлон» и «Меркурий».

Для изготовления деталей современных самолетов, двигателей, ракет и спутников применяются магниевые сплавы. Особенно эффективно их использование в кратковременных полетах (так, в ракетах типа «воздух—воздух» доля этих сплавов достигает 90%). Магниевые сплавы применялись в американских ракетах «Титан», «Тор», «Юпитер», «Поларис», для изготовления соединительных приспособлений космического корабля «Джемини».

В последние годы в конструкциях авиационной и космической техники начали применяться бериллий и его сплавы. Применение бериллия позволяет уменьшить вес несущей конструкции искусственных спутников Земли более чем на 35%. Бериллий применялся в конструкциях космических кораблей «Аполлон», многих ракет, например, «Минитмен». Бериллий — лучший материал для антенн всех летательных аппаратов, в том числе и космических.

Для изготовления силовых конструкций самолета (например, шасси) широко применяются легированные стали. В отечественной практике для этих целей применяют стали марок 27ХГСНМА, 30ХГСА, 35ХГСНМА, ВНЛ-3, ВНЛ-5 и др.

В современных реактивных и ракетных двигателях одной из главных проблем является создание материалов, способных противостоят действию значительных напряжений при высоких

температурах. Все эти материалы составляют большую группу жаропрочных сплавов. Многообразие современных жаропрочных сплавов связано с различными уровнями рабочих температур, достигающих до $0,9 T_{пл}$. ($T_{пл}$, К — температура солидуса). Жаропрочные сплавы изготавливаются на основе легких металлов (Mg, Al, Ti), а также меди, никеля, железа, кобальта и тугоплавких металлов (Nb, Mo, W и др.).

Высокие требования предъявляются к сплавам для изготовления лопаток авиационных газовых турбин. Для этих целей широко применяются никелевые сплавы с интерметаллидным упрочнением (сплавы типа ЖС6, ВХ4Л и др.). Применение этих сплавов позволило достичь рабочих температур до 1100°C . Максимально высокие рабочие температуры (до 2500°C и выше) достигаются благодаря применению жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлов.

Для изготовления сталей и сплавов ответственного авиационного назначения требуются металлы высокой чистоты. Если раньше многие сплавы выплавляли в открытых печах, то в настоящее время большинство сплавов получают в вакууме или инертной среде.

Для повышения ресурса и надежности авиационной техники необходимо совершенствование технологии производства специальных сталей и сплавов и разработка новых прогрессивных методов выплавки. В авиационной металлургии проведены значительные работы, направленные на повышение эффективности производства и коренное улучшение качества продукции.

В настоящее время получили дальнейшее развитие вакуумно-индукционная плавка (ВИП), вакуумно-дуговой (ВДП), электронно-лучевой (ЭЛП) и плазменно-дуговой (ПДП) процессы переплава, а также вытяжка труб из расплава, ВДП полых слитков, прессование сплавов из гранул, получение хлопьевидных чешуйчатых частиц металла и др. В лабораторных и промышленных условиях разработаны и внедрены в серийное производство новые и усовершенствованы действующие технологические процессы.

За рубежом производство стали и жаропрочных сплавов в вакууме находится на высоком уровне. Наибольшее распространение получили вакуумные индукционные печи в США, Англии, Японии и ФРГ; причем наблюдается тенденция роста их числа, емкости и производительности. Так, в США еще в 1962 г. печи емкостью 2—3 т считались крупными, а в 1968 г. были установлены уже 50-тонные вакуумные индукционные печи; в 1969 г. пущена 54-тонная вакуумная печь. В этих печах выплавляются не только жаропрочные никелевые сплавы, но и высокопрочные нержавеющие и конструкционные стали для авиастроения, ракетостроения и космических аппаратов.

2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ 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 менять, не меняя числа фаз. Этими переменными являются давление, температура и состав фаз. Таким образом, давление — одно из важнейших переменных, 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 — это состояние чистого твердого, жидкого или газообразного вещества при давлении 1 атм. При этом определяют разность $F - F^0$, т. е. $F - F^0 = RT \ln a$, где F^0 — стандартная свободная энергия, a — активность (для стандартного состояния $a = 1$).

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

Изменение свободной энергии этой реакции

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

Если реагенты находятся в стандартном состоянии, то

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

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

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

$$\Delta F^0 = -RT \ln K.$$

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)

$$\Delta F_{(1)}^0 = 4 \Delta F_{(1)} - 4 \Delta F_{(3)} - \Delta F_{(2)} \quad \text{и} \quad K_{(1)} = \frac{K_{(4)}^4}{K_{(3)}^4 \cdot K_{(2)}}.$$

Значения $\Delta F_{(2)}$, $\Delta F_{(3)}$, $\Delta F_{(4)}$ приводятся в графиках и таблицах литературы [1].

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 выражают в молярных долях N . Так, для двойного раствора A и B молярная доля A 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 подчиняется закону Рауля, т. е. $P_A = N_A \cdot P_A^0$.

Для разбавленных 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. 1 приведено соотношение между активностями по Раулю и Генри.

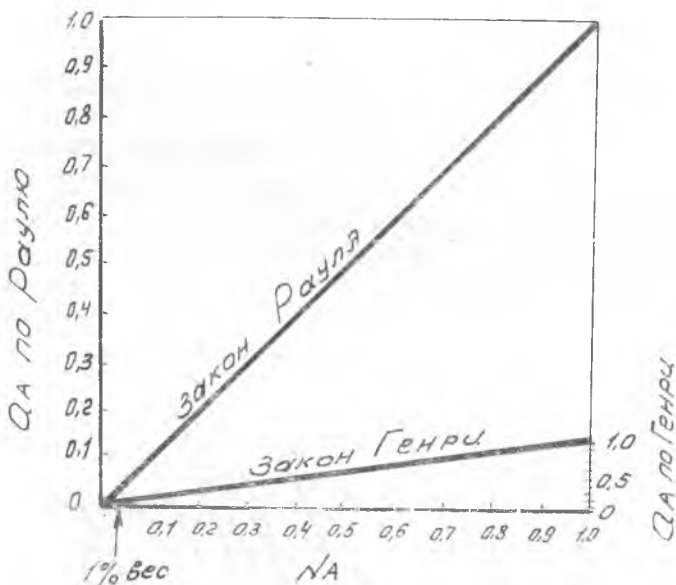


Рис. 1. Соотношение между активностями по Раулю и Генри

3. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНОВ ТЕРМОДИНАМИКИ В ВАКУУМНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Рассмотрим реакции, представляющие наибольший интерес в металлургии.

Реакции газов с твердыми веществами. Рассмотрим реакцию $\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$.

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



Найдем значения ΔF^0 при температуре 1200° из таблиц или графиков, приводимых в литературе [1]:

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

$$\Delta F_{\text{FeO}}^0 (1200^\circ) = -80000 \text{ кал } (335,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}).$$

Тогда изменение стандартной свободной энергии реакции при 1200° составит

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

$$\text{Из } \Delta F^0 = -RT \ln K \text{ найдем } \lg K = \frac{-29850}{4,575 \cdot 1200} = -5,45,$$

$$K = \frac{P_{CO} \cdot a_{Fe}}{a_{FeO} \cdot a_C} = 3,5 \cdot 10^{-6}.$$

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

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

Испарение. При плавке в вакууме из сплавов испаряются компоненты с высокой упругостью паров. На рис. 2 показана зависимость упругости паров металла от температуры. Для получения парциального давления какого-либо компонента сплава

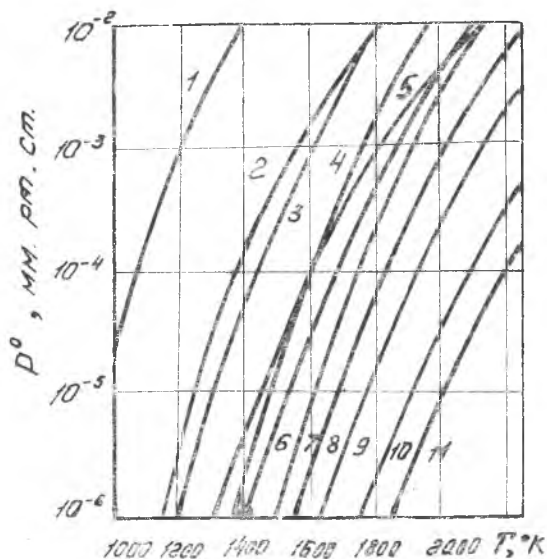


Рис. 2. Изменение давления пара металлов в зависимости от температуры: 1—Рв; 2—Мп; 3—Аг; 4—Сг; 5—Sn; 6—Сu; 7—Si; 8—Fe; 9—Ni; 10—Co; 11—Ti

над расплавом необходимо величину P^0 , приведенную на этом рисунке, умножить на активность $P_A = a \cdot P^0_A$. Если активность a неизвестна, можно применить приближенно закон Рауля, т. е. активность приравнять к молярной доле $P_A = N_A \cdot P^0_A$.

При вакуумной плавке интерес представляют элементы, расположенные левее железа (см. рис. 2), особенно Mn и Cr, так как они могут испаряться в процессе плавки.

Максимальная скорость испарения определяется из соотношения

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

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

M — молекулярный вес, г;

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

T — температура, °К;

P_A — давление пара, дин/см².

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

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

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

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

$$H_{2\text{газ}} + [S] = H_2S_{\text{газ}}, \quad K = \frac{P_{H_2S}}{P_{H_2} \cdot a_S} = 2,6 \cdot 10^{-3} \quad (\text{при } 1600^\circ\text{C}).$$

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

$$CeS = [Ce] + [S], \quad K = [\% Ce] \cdot [\% S] = (1,5 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \quad (\text{при } 1600^\circ\text{C}).$$

Если в ванну ввести 0,3% церия, то она будет находиться в равновесии при 0,005% серы. Главный недостаток металлических дисульфураторов — 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, что сталь содержит 0,2% С и остаточное давление составляет 10^{-5} атм. Раскисление углеродом идет по реакции $[C] + [O] = CO_{\text{газ}}$.

$$\text{Константа равновесия этой реакции } K = \frac{P_{CO}}{[\% O] \cdot [\% C]}.$$

При 1600°C $K = 420$. Тогда $[\% O] = \frac{P_{CO}}{K \cdot [\% C]} = \frac{10^{-3}}{420 \cdot 0,2} = 1,2 \cdot 10^{-7}$.

2. Восстановление водородом. Раскисление водородом идет по реакции



$$K = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} \frac{1}{\% O}$$

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

Окисел	1800 °К, кал.
SiO_2	- 133200
2 MgO	-- 172660
$2/3 Al_2O_3$	- 174800
ZrO_2	-- 181000
2 BeO	- 202600
2 CaO	-- 209600
TiO_2	- 210000

В верхних рядах расположены легко восстанавливаемые 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 $2/3 Al_2O_3 + [Ti] = 4/3 [Al] + TiO_2$

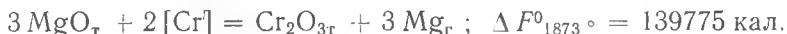
может протекать и в вакууме и при атмосферном давлении. Но при высокой температуре Al имеет заметную упругость пара (при 1600° она составляет 4,6 мм рт. ст.).

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

В случае магнетитовой футеровки может идти реакция



Для расчета рассмотрим реакции:



Константа равновесия рассматриваемой реакции равна

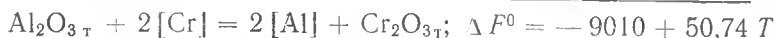
$$K = \frac{P_{\text{Mg}}^3}{[\% \text{Cr}]}; \lg K_{1873^\circ} = - \frac{\Delta F^0_{1873^\circ}}{RT} = - \frac{139775}{4.576 \cdot 1873^\circ}.$$

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

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°K $\Delta F_{1873^\circ} = 85990$ кал.

$$\text{Тогда} \quad K = - \frac{\Delta F^0_{1873^\circ}}{RT} = - \frac{85990}{4.576 \cdot 1873^\circ};$$

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

Константа равновесия реакции $K = \frac{a_{\text{Al}}^2}{a_{\text{Cr}}^2}$. Дальнейшие рас-

четы показывают, что при выплавке в вакууме стали с 18% Cr 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 CO (при взаимодействии углерода, растворенного в металле, с кислородом) и испарения летучих субокислов. Субокислы

представляют собой наиинишие 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

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

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

Глава 2. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ И ПЕЧИ

1. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ И ВАКУУММЕТРЫ

Для создания вакуума в вакуумных печах применяют преимущественно механические и пароструйные вакуумные насосы [2].

Механические насосы. Одной из разновидностей механических насосов является многопластинчатый насос (рис. 3, а).

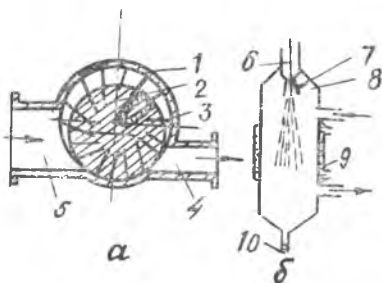


Рис. 3. Схемы вакуумных насосов: а — многопластинчатого; б — пароструйного; 1 — корпус; 2 — ротор; 3 — пластины; 4 — выхлопной патрубок; 5 — всасывающий патрубок; 6 — пар; 7 — сопло; 8 — рабочая камера; 9 — охлаждение; 10 — сливной трубопровод

Внутри кожуха размещается эксцентрически расположенный ротор с пластинами. При вращении ротора пластины под действием центробежной силы выходят из пазов и скользят по внутренней поверхности кожуха. Объем рабочих камер между поверхностью кожуха и двумя соседними пластинами по мере движения от всасывающего патрубка к выхлопному уменьшается, газ сжимается и выбрасывается в выхлопной патрубок. Трущиеся поверхности пластин и кожуха смазываются маслом. Откачи-

ваемый газ выбрасывается в атмосферу. При параллельном включении насосов возрастает скорость откачки, при последовательном — глубина вакуума.

В СССР выпускают насосы типа РВН-8, РВН-30, РВН-60 и РВН-75 (цифры показывают скорость откачки м³/мин, при атмосферном давлении). Остаточное давление достигает 530 Па (4 мм рт. ст.). Достоинством многопластинчатых насосов является высокая производительность при небольших габаритах, а недостатком — относительно малое создаваемое разрежение и чувствительность к попаданию абразивных частиц.

Пароструйные насосы. В пароструйных насосах пар истекает с большой скоростью через сопло в рабочую камеру насоса (рис. 3,б).

Откачиваемый газ поступает в рабочую камеру через всасывающий патрубок. Газ захватывается струей пара. На станках рабочей камеры пар конденсируется и конденсат по сливному трубопроводу возвращается в кипятильник для получения пара. Откачиваемый газ выбрасывается в выхлопной патрубок.

В зависимости от характера истечения струи пара пароструйные насосы делятся на эжекторные, бустерные и высоковакуумные, снижающие давление соответственно до 1,33; 0,01 и 10⁻⁵ Па (10⁻²; 10⁻⁴ и 10⁻⁷ мм рт. ст.).

В качестве рабочей жидкости для образования пара используют масло, в высоковакуумных насосах также ртуть. Эжекторные насосы могут быть пароводяными. В пароводяных насосах пар из выхлопного патрубка выбрасывается в атмосферу.

В эжекторных насосах плотность струи пара высокая, и этой струей газ увлекается из откачиваемого пространства. В высоковакуумных насосах плотность струи небольшая, и отсасываемый газ попадает в струю пара вследствие диффузии и увлекается в выхлопной патрубок. В бустерных насосах плотность струи изменяется: при высоких давлениях струя пара более плотная, чем при низких, что обеспечивает относительно большую скорость откачивания при широком диапазоне.

Наиболее высокую производительность, достигающую сотен и тысяч кубических метров в минуту, имеют парожеторные насосы. Например, насос НЭВ-450 откачивает со скоростью 8800 м³/мин при давлении пара 0,9 МПа/м² (9 атм).

Вакуумные установки оборудованы механическими насосами, создающими предварительное разрежение (форвакуумные насосы), и бустерными (вакуумными).

Задачи измерения давлений газа, меньших 1 мм рт. ст., не всегда просты. При измерении давления газа постоянно сказывается (в большей или меньшей степени) состав смеси газов, присутствие сжижающих паров, место измерения и пр. [2].

Для измерения низких давлений газа применяют манометры. Поскольку в вакуумной технике приходится иметь дело с очень широким диапазоном давлений, то охватить их каким-либо одним манометром универсального типа не представляется возможным.

В современных плавильных вакуумных установках разрежение в пределах от 1 до 0,001 мм рт. ст. измеряют при помощи манометров с непрерывным отсчетом, т. е. при помощи термоэлектрического манометра или альфатрона, а для более низких давлений — при помощи ионизационного манометра.

Показания этих манометров зависят от рода газа, давление которого измеряется. При этом возможна некоторая неточность при изменении вакуума, поскольку род газа, как правило, заранее неизвестен.

При работе с термоэлектрическим манометром зонд его должен быть всегда защищен экраном во избежание отложения металлических паров, которые могут вызвать постепенное искажение калибровочной кривой.

2. ВАКУУМНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ПЕЧИ И ОСОБЕННОСТИ ПЛАВКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

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 [3].

Выбор рабочей частоты генератора, геометрических параметров индуктора (диаметра, высоты), количества витков их се-

чения зависит от требуемой электрической мощности, а также от свойств и размеров переплавленных материалов.

Отечественная промышленность выпускает промышленные печи периодического действия типа ИСПВ-0,6 ПИ и ИСВ-1,0 ПИ. Технические характеристики печей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики печей периодического действия

Параметры	Тип печи	
	ИСПВ-0,6 ПИ	ИСВ-1,0 ПИ
Емкость тигля, кг	600	1000
Мощность генератора, кВт	500	500
Напряжение генератора, В	1500	1500
на индукторе, В	2000	2000
Частота, Гц	1000	1000
Остаточное давление в камере, Па	$(6,65 \times 10^{-1})$	$(6,65 \times 10^{-1})$
Средняя продолжительность рабочего цикла, час	1,67	3,15
Средняя производительность, кг/ч	288	318
Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/кг	2,55	2,26

Печи имеют горизонтальную плавильную камеру, передвигающуюся на самоходной тележке при загрузке и разгрузке печи, и неподвижную крышку, на которой смонтирован индуктор. Догрузка шихты производится через камеру загрузки, а присадка легирующих и раскисляющих добавок через четырехсекционный дозатор.

Большинство промышленных печей, эксплуатируемых в настоящее время в СССР, являются полунепрерывного действия. Типичными установками такого типа являются печи ОКБ-571Б и ИСВ-2,5. Технические характеристики печей приведены в табл. 3.

Широкое распространение на заводах отечественной металлургии получила печь ОКБ-571Б (рис. 4), состоящая из камер плавления, загрузки и разлива.

Печь оборудована дозатором и термопарой погружения, домиком для пробивки мостов и осаживания шихты, а также устройством для удаления шлака и очистки тигля после слива плавки.

Характеристики печей полунепрерывного действия

Параметры	Тип печи	
	ОКБ-571Б	ИСВ-2,5 НИ
Емкость тигля, т	0,5	2,5
Мощность генератора, кВт	250	1500
Напряжение на индукторе, В	1000	1000
Частота, Гц	2000	500
Максимальная температура металла, °С	1800	1800
Остаточное давление, Па	$5 \cdot 10^{-3} (6,65 \cdot 10^{-1})$	$5 \cdot 10^{-3} (6,65 \cdot 10^{-1})$
Продолжительность рабочего цикла, ч	3,5	3,35
Средняя производительность, кг/ч	170	750
Удельный расход электроэнергии, кВт · ч/кг	—	2,27

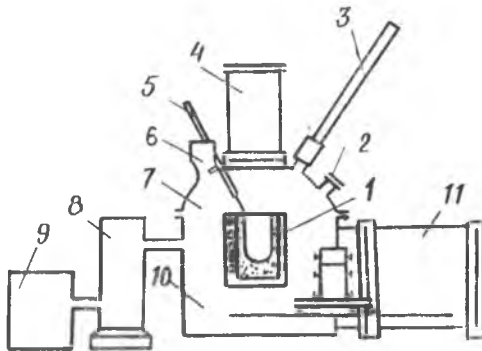


Рис. 4. Схема печи ОКБ-571Б: 1—тигель; 2—гляделка; 3—термомпары; 4—камера загрузки шихты; 5—ломик для осаживания шихты; 6—дозатор; 7—съемная крышка; 8—бустерный насос; 9—форвакуумный насос; 10—камера печи; 11—камера подачи и извлечение изложниц

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

Конструкция камеры загрузки показана на рис. 5.

Внутри цилиндрического кожуха на тросе или цепи подвешивается загрузочная корзина, в которую закладывается шихта.

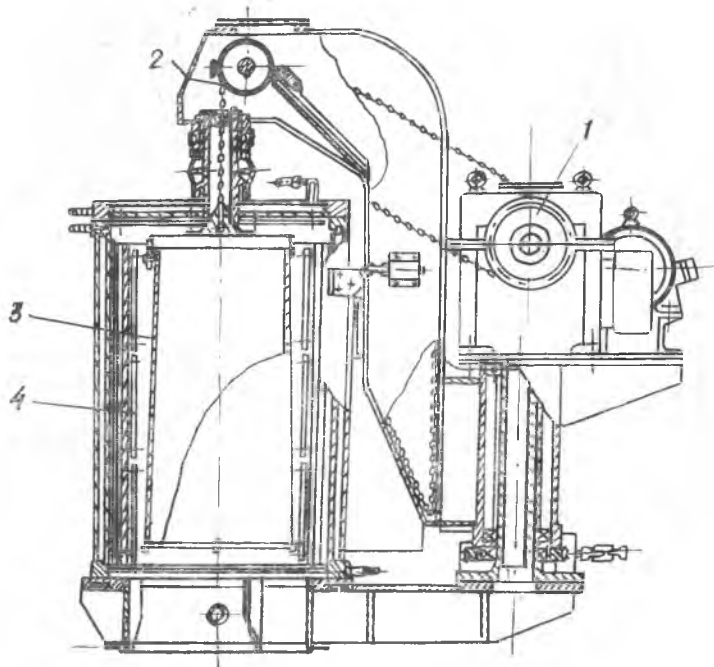


Рис. 5. Камера загрузки печи ОКБ-571 Б: 1 — привод; 2 — барабан; 3 — загрузочная корзинка; 4 — нагреватели

Боковая стенка корзин выполнена из листовой стали, а дно из легкоплавкого металла. При опускании корзины в разогретый тигель проволока плавится, лепестки под тяжестью шихты раскрываются, и шихта высыпается в тигель. Для предварительного подогрева шихты возможна установка в кожухе камеры нагревателей. Трос или цепь, на котором подвешена корзина, укреплены на барабане, приводимом в движение электроприводом.

Легирующие и раскислители вводят через дозатор с откидными крышками (рис. 6). 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.

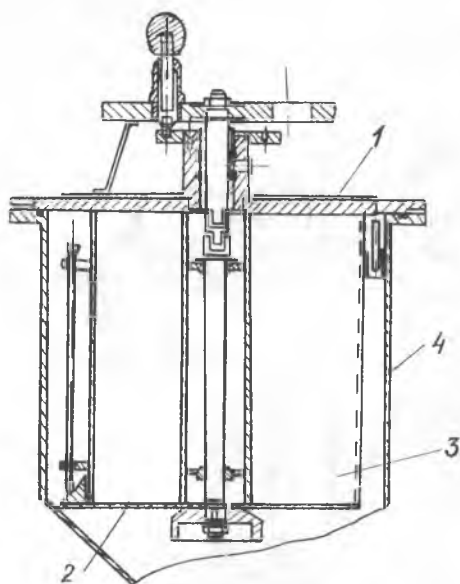


Рис. 6. Дозатор для присадки легирующихся и раскисляющих добавок печи ОКБ-571 Б: 1 — крышка; 2 — откидное донышко; 3 — секции дозатора; 4 — кожух

Вакуумная система печи ОКБ-571Б состоит из пяти форвакуумных (ВН-6Г) и трех бустерных (ВИ-4500) насосов и обеспечивает независимую откачку вакуумных узлов печи.

При производстве отливок из высоколегированных марок сталей создан высоковакуумный плавильно-разливочный агрегат полунепрерывного действия ВИАМ-165. Этот агрегат успешно используется при производстве фасонных отливок, слитков и различного рода заготовок из сплавов, склонных к пленообразованию.

Плавильно-разливочный агрегат состоит из

следующих основных узлов: плавильно-разливочной камеры с печным блоком, дегазационной проходной камеры, системы загрузки форм блока вакуумных насосов, загрузочного устройства и дозаторов, системы контроля температуры и пространственных манипуляторов. Агрегат оборудован гелиевым течеискателем, масс-спектрометром для анализа газов в печном пространстве и системой приборов для контроля давления и хода процесса плавки.

Плавильная камера представляет собой металлический водоохлаждаемый цилиндр, внутри которого размещен плавильный блок. Камера является корпусом агрегата, на ней смонтированы многочисленные конструктивные элементы, позволяющие без нарушения вакуума загружать тигель индукционной печи, осаживать шихту, измерять температуру металла, подавать разливочную воронку при сливе металла, очищать тигель индукционной печи после каждой плавки, а также вести наблюдение за плавкой и разливкой металла.

Печной блок размещен на кронштейне внутри плавильно-разливочной камеры и состоит из плавильной печи емкостью 50—100 кг, силовых коммуникаций, системы охлажде-

ния и механизма поворота. Конструктивно подвод к индуктору электроэнергии и воды и устройство для поворота печи выполнены в виде коаксиального ввода. Этот ответственный узел агрегата надежен в работе и весьма компактен.

Дегазационная проходная камера служит для предварительного вакуумирования и подогрева форм или изложниц. Она представляет собой горизонтально расположенный стальной офланцованный цилиндр, внутри которого размещены электронагреватели; с их помощью можно поддерживать внутри камеры температуру до 800° .

В нижней части камеры имеется механизм передвижения, который подает платформу с формами или изложницами по направляющим в дегазационную камеру, а затем — на заливку. Плавно-разливочная и дегазационная камеры разделены шибером, который открывают только при одинаковом разряжении в камерах.

При загрузке шихты также используется камера предварительного вакуумирования вакуумным шибером от плавно-разливочной камеры. Ведерко с шихтой или шихтовая болванка подается к загрузочному устройству. Шибер при этом перекрывают, и шихту подвешивают в камере предварительного вакуумирования при помощи захватов. Затем крышку камеры закрывают и откачивают воздух, после чего открывают шибер и шихту опускают непосредственно в печь.

После загрузки ведерко-контейнер поднимают вверх, шибер закрывают, открывают крышку, и процесс повторяют снова до полной загрузки печи.

Дозатор служит для введению в металл различных добавок — легирующих элементов, модификаторов, раскислителей и др. Дозатор имеет несколько отделений, в каждое из которых помещают определенную добавку. При помощи рычага добавка перемещается до отсечки, направляющей ее на промежуточный лоток, с которого добавка падает в печь. Дозатор отделен от плавно-разливочной камеры шибером, т. е. дозатор можно вновь заполнить необходимыми материалами во время плавки, не нарушая вакуума в плавильной камере.

Блок вакуумных насосов, расположенных позади агрегата, состоит из двух насосов ВН-6 и одного бустерного насоса БИМ-4500. Один насос ВН-6 служит для предварительной откачки воздуха из объема печи, бустерный насос со вторым форвакуумным насосом служит для обеспечения рабочего вакуума в течение плавки. Рабочее давление составляет $5 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$ мм рт. ст. ($6,65 \times 10^{-1} - 6,65 \times 10^{-2}$ Па).

Электропитание агрегат получает от машинного генератора мощностью 100 кВт; напряжение на индукторе 400 В, частота 2500 Гц.

Плавка в зависимости от сорта шихты и рода сплава длится от 1 до 2 часов. Суммарный объем плавильно-разливочной и дегазационной камер составляет 5 м^3 , занимаемая агрегатом площадь — 64 м^2 .

Пульт управления агрегатом размещается на специальных платформах. Несмотря на сложность конструкции, агрегат достаточно прост в эксплуатации. Работа на нем сводится к следующему.

Прокаленные керамические формы, кокли или изложницы устанавливают на платформу загрузочной тележки, которая подкатывается к дегазационной камере. Дверь камеры открывают и платформа с помощью механизма привода перемещается по направляющим в камеру. Затем дверку закрывают, открывают шибер и включают вакуумные насосы, которые вакуумируют камеру и формы. В плавильно-разливочной камере (в индукционной печи) в это время расплавляется шихта, вводятся добавки, и металл доводится до заданного химического состава и прогревается до необходимой температуры. Все эти операции совершаются при рабочем вакууме, равном 10^{-3} мм рт. ст.

Когда металл готов и формы откавакумированы, открывается шлюз и платформа подается в плавильно-разливочную камеру. Плавку и разливку можно осуществлять как при разряжении, так и в атмосфере нейтральных газов: аргона, гелия или азота — при определенном давлении.

Для заливки форм печь наклоняют. На вакуумном плавильно-разливочном агрегате можно выплавлять любые стали и сплавы и отливать различные изделия, в том числе фасонные отливки, чушки, слитки, электроды для электродугового переплава и пр. (максимальные габариты формы $400 \times 500 \times 1500$ мм). Значительные размеры тигля позволяют использовать крупногабаритную шихту и перерабатывать отходы, что значительно снижает себестоимость изготовления деталей из высоколегированных сплавов.

Отливки больших размеров получают на плавильно-разливочном агрегате ВИАМ-24. Емкость печи этого агрегата 200—250 кг. Максимальный диаметр и высота формы могут достигать 1 м. Плавильная камера и некоторые узлы агрегата ВИАМ-24 имеют сходство с элементами конструкции агрегата ВИАМ-165. Но агрегат ВИАМ-24 усовершенствован и имеет большие размеры. Этот агрегат при помощи двух вакуумных насосов ВН-6 и бустерного насоса производительностью 1000 л/мин может обеспечить давление до $5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.

Футеровка плавильных индукционных вакуумных печей значительно отличается от футеровки обычных печей, так как не каждый материал способен выдержать глубокие разряжения.

В этой связи для футеровки вакуумных печей, как правило, применяют плавленные керамические материалы. Наиболее хорошо зарекомендовали себя тигельные массы двух составов:

1. 60—70 % плавленной смеси магнезита и 40—30 % электрокорунда, в том числе 50% зернистостью 3—1 мм и 50 % — зернистостью 1 мм. Эта смесь рекомендуется для печей емкостью более 50 кг;

2. 70—80 % плавленной смеси электрокорунда и 30—20 % магнезита, зернистость та же, что и для смеси 1. Эта смесь рекомендуется для печей емкостью до 50 кг.

В качестве связующего в этих массах используют 0,7% плавленого шпата и 3—4 % воды. Перед набивкой печи катушка индуктора подвергается специальной обработке. После гидроиспытания витки индуктора покрывают семью слоями шеллачного лака и обматывают высоковольтной хлорвиниловой лентой. Затем витки обматывают резиностеклотканью и наносят на них два слоя шеллачного лака, при этом покрытие верхнего и нижнего витка указанными материалами удваивается.

Катушку индуктора внутри промазывают смесью электрокорунда с двуокисью циркония и этилсиликатом на толщину 3—5 мм, этой же смесью заполняют пространства между витками.

Обмазка просушивается на воздухе 10—20 час, затем катушку опрыскивают гидролизованным этилсиликатом и оклеивают стеклотканью. Тигель вакуумной печи по конструкции такой же, как тигли обычных печей с той лишь разницей, что воротник набивают из плавленной смеси на жидком стекле (до 3—4%), а сливной носок изготавливают из шмотного кирпича.

Футеровка тигля проявляется на воздухе в течение 20—24 час и просушивается электронагревателем 7—10 час. Спекают тигель нагревом графитового стержня с постепенным (примерно 8—10 час) доведением температуры до 1400°. После этого тигель загружают чугуном; расплавленный чугун в течение 30—40 мин выдерживают при 1400—1500°, затем в тигле проводят 2—3 плавки малоуглеродистой стали при температуре 1650—1700°. Окончательная подготовка тигля сводится к проведению в нем двух промывочных плавков отходов сплавов, первую плавку проводят в обычных условиях, вторую — в вакууме.

Приготовленные таким образом тигли обеспечивают надежную работу вакуумных агрегатов; тигли для печей емкостью более 50 кг выстивают до 50 плавков, тигли для печей емкостью менее 50 кг — более 100 плавков.

Шихтовыми материалами для выплавки высоколегированных сталей и сплавов могут служить материалы высокой чистоты. К ним относятся: никель электролитический марки

Н-0 и Н-1, хром алюмотермический марки Х-0 и Х-1, кобальт марки К-0 и К-1 и другие.

Вакуумная плавка позволяет использовать в качестве шихты 100 % отходов с некоторым добавлением во время плавки элементов с высокой упругостью пара, т. е. с учетом потерь таких элементов. Температура измеряется термопарой погружения. Температура заливки определяется природой сплава и конфигурацией отливки и всегда бывает ниже, чем при разливке в обычных условиях. Наилучшие результаты получаются при вторичном переплаве металла. В этом случае сплав имеет равномерный состав, стабильные механические свойства, хорошо заполняет форму.

В промышленных вакуумных индукционных печах выплавляют главным образом жаропрочные сплавы, предназначенные для отливки лопаток или дисков авиационных двигателей.

Технология плавки включает следующие периоды: загрузку и расплавление шихты, рафинирование жидкого металла (раскисление углеродом, дегазацию и испарение летучих примесей), легирование и доводку сплава по химическому составу, разливку.

В зависимости от вида и качества применяемых исходных шихтовых материалов роль каждого из периодов плавки может измениться [4]. В тигель, как правило, загружают железо, никель, кобальт, молибден, вольфрам, хром и другие металлы, не образующие химически прочных окислов и мало летучие, а также углеродосодержащие реагенты. Иногда хром присаживается в жидкий металл после того, как в процессе расплавления сплав существенно дегазирован.

После рафинирования жидкого металла от газов и примесей вводят металлы, обладающие повышенным сродством к кислороду и азоту (алюминий, титан, цирконий) и в последнюю очередь перед выпуском плавки — легкоиспаряющиеся металлы (как правило, при некотором давлении аргона в печи). Расплавление ведут на максимальной мощности. В процессе расплавления поддерживают по возможности низкое остаточное давление в печи для интенсивного кипения расплавляемого металла. В этот период из шихты удаляется основное количество газов и частично летучие примеси.

Иногда производят предварительное раскисление расплава углеродом, для чего после расплавления в металл при 1500—1600° вводят графитовый бой. Присадка углерода иногда сопровождается кипением металла. Однако, поскольку концентрация кислорода в металле к концу расплавления незначительна, скорость удаления кислорода невелика (процесс лимитируется диффузией кислорода в расплаве). Так как возможно дополнительное поступление кислорода из футеровки, заметного

снижения содержания кислорода в металле, как правило, не наблюдается. При этом значительная часть введенного в металл углерода расходуется на легирование.

Для окончательной дегазации и рафинирования от летучих примесей производят выдержку жидкого металла в вакууме. Более полного рафинирования металла от примесей достигают, увеличивая время выдержки. Кроме того, используют приемы, интенсифицирующие удаление примесей (электромагнитное перемешивание металла, продувку инертным газом и др.).

3. ВАКУУМНЫЕ ДУГОВЫЕ ПЕЧИ И ОСОБЕННОСТИ ПЛАВКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

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. 7).

Расходуемый электрод является катодом, он приварен к штоку. Слиток направляется в водоохлаждаемый кристаллизатор, закрытый крышкой с гляделкой. 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. Печи имеют глухой медный кристаллизатор, отодвигаемый в сторону для загрузки элект-

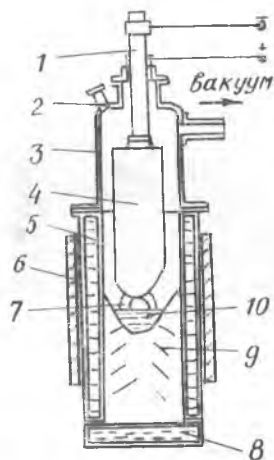


Рис. 7. Вакуумная дуговая печь: 1 — шток; 2 — гляделка; 3 — крышка; 4 — расходуемый электрод; 5 — кристаллизатор; 6 — соленоид; 7 — электрическая дуга; 8 — водоохлаждаемый поддон; 9 — слиток; 10 — ванна жидкого металла

рода через низ вакуумной камеры и загрузочную тележку с двумя кристаллизаторами.

Схематическое изображение установки вакуумной дуговой печи приведено на рис. 8.

Шток, к которому присоединен расходимый электрод, поднимается с помощью механизма с электроприводом, а опускается под действием силы тяжести и атмосферного давления. Шток находится внутри вакуумного цилиндра с направляющими для перемещения штока. Цилиндр плотно соединен с вакуумной ка-

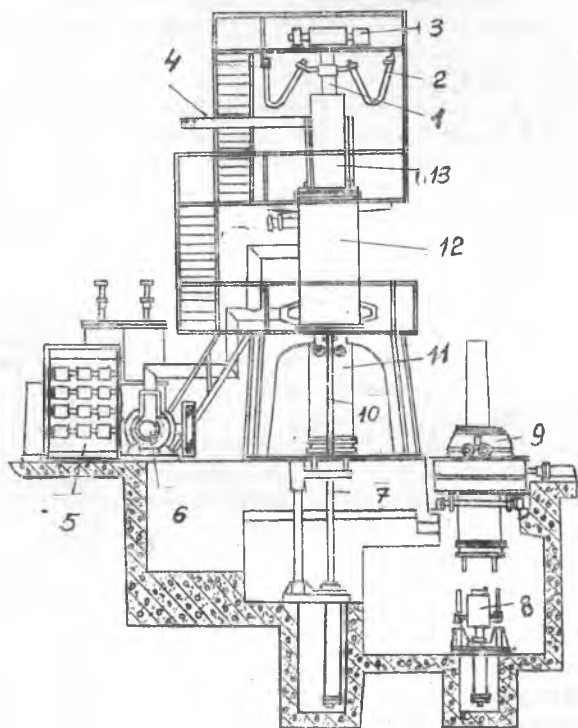


Рис. 8. Установка с вакуумной дуговой печью:
1 — шток; 2 — гибкие кабели; 3 — механизм с электроприводом; 4 — шины; 5 — система с комплектом золотниковых распределителей; 6 — насос; 7 — шток; 8 — механизм с гидроприводом; 9 — тележка с гидроприводом; 10 — направляющая; 11 — кристаллизатор; 12 — вакуумная камера; 13 — вакуумный цилиндр

мерой, внутри которой находится расходуемый электрод. К камере плотно прижат специальными прижимами медный водоохлаждаемый кристаллизатор. Опускание и подъем кристаллизатора производится штоком гидравлического цилиндра по направляющей. Для отвода кристаллизатора из-под печи имеется тележка с гидроприводом.

Выгрузка слитка из кристаллизатора производится механизмом с гидроприводом. Установка имеет систему с комплектом золотниковых распределителей. Ток от подстанции с полупроводниковыми выпрямителями подводится гибкими кабелями к штоку и шинами к верхней части вакуумной камеры.

Производство металла повышенного качества для крупногабаритных изделий осуществляется, как правило, в печах с водоохлаждаемым кристаллизатором — вакуумных дуговых. При этом исходный металл для вакуумного дугового переплава зачастую получают также в вакуумных индукционных печах.

Метод получения высококачественной стали в дуговой вакуумной печи с расходуемым электродом обладает следующими достоинствами [5]:

отсутствует огнеупорная футеровка и отпадает возможность загрязнения металла продуктами диссоциации ее компонентов; успешно осуществляется дегазация металла и удаляется значительное количество неметаллических включений. Имеется возможность получать весьма крупные слитки (в настоящее время до 60 т) плотного строения с малой усадочной раковинной и благоприятной структурой.

Главным недостатком таких печей является необходимость изготовления литых или кованных металлических электродов, переплавляемых в процессе вакуумной плавки. Из числа других недостатков надо отметить невозможность легирования металла в печи, относительно невысокую производительность печей, значительную стоимость установки и худшие технико-экономические показатели, чем при плавке в обычных дуговых печах.

Плавка в дуговой вакуумной печи состоит из следующих операций: 1 — установка электрода в кристаллизаторе; 2 — присоединение кристаллизатора с электродом в камере печи; 3 — приварка электрода к хвостовику и проверка ее качества; 4 — откачка печи; 5 — образование первоначальной ванны металла на поддоне печи; 6 — плавление электрода; 7 — выведение усадочной раковины при уменьшенном токе; 8 — охлаждение слитка; 9 — выпуск воздуха в камеру печи; 10 — отсоединение кристаллизатора со слитком; 11 — очистка печи; 12 — удаление слитка из кристаллизатора.

Большая часть всего времени плавки приходится на плавление электрода.

Основную часть себестоимости стали (около 80%) составляет стоимость электродов, поэтому их удешевление имеет весьма важное значение. В настоящее время более дешевыми являются электроды, полученные на установках полунепрерывной разливки.

Рассмотрим процесс плавки в отечественной дуговой вакуумной печи типа ДСВ.

До начала работы кристаллизатор, поддон, камеру, шток и гляделки очищают от шлака. Электроды должны быть очищены от окалины и не иметь искривлений по длине. Способ установки электрода в печи зависит от конструкции печи. В печи с отъезжающим кристаллизатором (см. рис. 8) электрод устанавливают следующим образом. В кристаллизатор с прикрепленным к нему поддоном и вложенным темплетом («затравкой»), находящимся на тележке вне печи, устанавливают электрод, и закатывают тележку под вакуумную камеру. Затем кристаллизатор поднимают, соединяют его с камерой, печь вакуумируют, приводят в соприкосновение новый электрод с хвостовиком (огарком) электрода от предыдущей плавки, включают ток, и сваривают электроды с помощью образовавшейся электрической дуги. Качество сварки проверяют, удаляют наплывы, для чего в печь впускают воздух и открывают. После проверки в печи создают рабочий вакуум и начинают плавку. Расходуемый электрод расплавляется постепенно, начиная с нижнего конца.

Сначала дуга зажигается между электродом и затравкой, а затем между электродом и поверхностью образовавшегося слитка. Расплавившийся металл электрода в виде отдельных капель поступает в небольшую ванночку жидкого металла, подерживаемую за счет тепла дуги на поверхности наплавляемого слитка.

Для компенсации отвода тепла большой поверхностью охлаждаемых стенок кристаллизатора и поддона переplав ведут на несколько повышенной силе тока. Примерно через 10—20 мин силу тока снижают до нормального значения. Когда плавление электрода приближается к концу, ток уменьшают или на короткое время отключают с тем, чтобы при последующем кратковременном включении вывести из слитка образовавшуюся усадочную раковину. После отключения печи слиток выдерживают в вакууме. Затем в печь впускают воздух, кристаллизатор со слитком опускают на тележку и перевозят его к месту разгрузки. Во время работы первого кристаллизатора, второй кристаллизатор очищают и готовят к плавке.

Переplав производится при автоматическом управлении перемещением электрода. В процессе плавки контролируются ток

и напряжение дуги, разряжение в печи, температура выходящей воды и давление поступающей воды. Обычно рабочий вакуум (остаточное давление) в печи составляет 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. ($1,33$ — $1,33 \cdot 10^{-1}$ Па).

В процессе капельного плавления электрода перегрев металла незначителем (30 — 70°C), температура дуги в вакууме значительно ниже, чем обычной дуги. Хотя жидкий металл в верхней части слитка является анодом, в котором выделяется количество тепла, все же температура жидкого металла незначительно превышает температуру его плавления.

В процессе переплава происходит дегазация металла, испарение его компонентов, раскисление металла и удаление неметаллических включений. Можно считать, что первоначальная концентрация водорода, азота и кислорода снижается соответственно на 70 — 90 , 40 — 50 и 60 — 70% ; значительно уменьшается содержание неметаллических включений, особенно оксидов. Нужно отметить, что азот удаляется в меньшей степени, чем в индукционной вакуумной печи. Слитки, кристаллизующиеся в водоохлаждаемом кристаллизаторе, более однородны по химическому составу и микроструктуре, содержат более мелкие неметаллические включения, чем обычные слитки.

При вакуумном дуговом переплаве из металла путем испарения успешно удаляется свинец, в меньшей степени цинк, висмут, кадмий, сурьма и в незначительном количестве — олово. Из основных компонентов сплава в наибольшей степени (до 20%) испаряется марганец. Содержание остальных компонентов в слитке мало отличается от исходного их содержания в электроде; несколько снижается содержание серы при переплаве высокоуглеродистой стали.

Стали и сплавы очень ответственного назначения получают путем нескольких последовательных переплавок металла. Например, плавку ведут в вакуумной индукционной печи, а затем электрод из полученного металла переплавляют в вакуумной дуговой печи. В ряде случаев осуществляют двойной и даже тройной переплав металла в вакуумной дуговой печи.

4. ВАКУУМНОЕ ТОЧНОЕ ЛИТЬЕ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Создание новых образцов техники, повышение их надежности, ресурса и долговечности требуют использования конструкционных материалов с высокими служебными свойствами и применения прогрессивных технологических процессов. В последние годы в авиационной промышленности постоянно наблюдается тенденция к увеличению количества деталей, изготавливаемых

одним из прогрессивных способов — методом точного литья по выплавляемым моделям.

Точное литье позволяет повысить коэффициент использования металла до 65—80 % вместо 15—30 % при изготовлении деталей из поковок и штамповок, в 3—4 раза сократить расход металла в стружку, в 5—6 раз снизить трудоемкость и резко сократить себестоимость. Кроме того, точное литье во многих случаях оказывается единственным способом получения деталей со сложной внутренней полостью из наиболее жаропрочных сплавов и высокопрочных сталей. Большое значение имеет и тот факт, что метод точного литья дает возможность получать детали с готовой поверхностью без припусков на механическую обработку, что в ряде случаев (например, для литья турбинных лопаток) значительно повышает усталостные характеристики и другие служебные свойства.

Исследования, проведенные научно-исследовательскими институтами, а также заводской опыт, показывают, что наиболее высокие и стабильные свойства жаропрочные сплавы и высокопрочные стали имеют при точном литье в вакууме.

При этом методе литья устраняется возможность образования окисных плен, снижается содержание газов, неметаллических включений и вредных примесей в металле, повышается плотность металла, исключается возможность обеднения легирующими элементами твердого раствора поверхности отливок.

Проблема повышения скорости и дальности полета в авиации, достигаемого путем увеличения тяги двигателей в результате повышения температуры газа у лопаток, в конечном счете определяется температурным уровнем жаропрочности и жаростойкости современных жаропрочных сплавов.

В последние годы в промышленности резко увеличился спрос на точнолитые детали, взамен изготавливаемых из поковок и штамповок. Детали, получаемые точным литьем, характеризуются высоким металлургическим качеством и применяются в самых ответственных узлах изделий авиационной и ракетной техники.

Экономическая эффективность при замене поковок и штамповок особенно возрастает с повышением прочности и жаропрочности сталей и сплавов, что обусловлено ухудшением обрабатываемости и увеличением стоимости металла.

Высокопрочные стали и жаропрочные сплавы, являясь, как правило, сложнoleгированными, содержат в своем составе хром, алюминий, титан и другие элементы, которые при выплавке и разливке металла в атмосферных условиях образуют окисные, нитридные и другие включения. Эти включения, а также газы и вредные примеси в виде висмута, свинца, серы и т.п. обуславливают значительное снижение механических, главным образом

пластических свойств и жаропрочности. Поэтому весьма актуальным и перспективным для дальнейшего повышения качества точнолитых деталей, их надежности и ресурса работы является точное литье в вакууме.

При выплавке и заливке в вакууме жидкая ванна изолируется от воздушной среды, что исключает образование окисных плен, нитридов и силикатных включений. Независимо от состава наблюдается резкое снижение газов по сравнению с литьем на воздухе.

Вакуумная индукционная выплавка обеспечивает значительное снижение вредных примесей по сравнению с шихтой и сплавом открытой стандартной выплавки. При выплавке и литье в вакууме за счет снижения содержания газов уменьшается усачная газовая пористость в отливках и, как следствие этого, увеличивается плотность металла.

Повышение чистоты и плотности металла при литье в вакууме способствует повышению пластичности и вязкости сплавов, резко уменьшает склонность к хрупкому разрушению, обеспечивает повышение стабильности механических свойств, увеличивает показатели длительной прочности, что в совокупности повышает эксплуатационные свойства литых деталей, их надежность и долговечность.

В настоящее время в авиационной промышленности методом точного литья в вакууме получают в основном детали газотурбинных двигателей и турбонасосных агрегатов: сопловые и рабочие лопатки, сопловые аппараты, рабочие колеса, крыльчатки, корпуса, фланцы и другие изделия из жаропрочных сплавов и из нержавеющей сталей корпуса и шнеки.

Детали самолетов, агрегатов и двигателей, помимо названных выше, отливают из нержавеющей и конструкционных высокопрочных сталей в атмосферных условиях, тогда как при изготовлении подобных деталей из поковок и штамповок применяют более качественные деформируемые стали вакуумного дугового или электрошлакового переплава. Поэтому при изготовлении листосварных конструкций служебные свойства литых деталей в некоторых случаях уступают свойствам деталей из поковок и штамповок.

Детали весом от 7 до 20—30 кг отливают в порционных печах ИСВ-006 (разработана ВНИИЭТО) и полунепрерывных печах ВИАМ-100 (разработана ВИАМ), ОКБ-694 (разработана ВНИИЭТО), ИСВ-0,025 (разработана ВНИИЭТО).

Наиболее совершенным плавильным агрегатом является вакуумная печь ВИАМ-100, которая позволяет получать отливки в формах размером \varnothing 500—600 мм и металлоемкостью 100 кг. Эта печь работает в полунепрерывном цикле без открытия камеры после каждой плавки.

Выплавку и заливку осуществляют в вакууме $(1-5) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (0,133 — 0,665 Па). Детали весом от 30 до 100 кг отливают в вакуумной печи ВИАМ-24. Эта печь позволяет получать отливки при разряжении $(1-5) \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (0,133 — 0,665 Па) в формах размером $\varnothing 900 \times 1000$ мм и металлоемкостью до 250 кг.

Глава 3. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

1. ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА ВАКУУМОМ, ИНЕРТНЫМИ ГАЗАМИ И ПОРОШКООБРАЗНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

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.

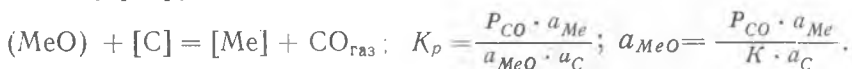
Обработка металлов вакуумом. Вакуум влияет на протекание реакций и процессов, в которых принимает участие газовая фаза. В стали практически всегда содержится углерод. В вакууме резко возрастает раскислительная способность углерода, так как реакция $[C] + [O] = CO_{газ}$ сдвигается вправо.

Константа равновесия этой реакции:

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

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



При обработке вакуумом удаляются также водород и азот. Известно, что $[H] = K \sqrt{P_{H_2}}$. В вакууме реакция $2[H] \rightleftharpoons H_{2\text{ газ}}$ сдвигается вправо, и поэтому водород удаляется из металла. Важно учесть, что водород обладает большой подвижностью (большой коэффициент диффузии водорода в жидком железе $D_N = (1,2 \div 1,5) \cdot 10^{-3}$ см/с).

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

Кроме того, в выделяющихся пузырьках CO, как в вакууме (в них парциальные давления азота и водорода равны нулю, т. е. $P_{H_2} = 0$ и $P_{N_2} = 0$), 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 азота 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) [5].

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) [5].

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 из-за вредного действия на здоровье рабочего (Pb, Se, Te).

2. ПЕРЕПЛАВНЫЕ ПРОЦЕССЫ (ВИП, ДВП, ЭШП, ЭЛП, ПДП)

Переplавные процессы — это различные способы переплава с целью повышения качества металла. Переplаву подвергают слитки и заготовки, полученные обычными способами

(конвертор, мартен, электродуговая печь). Иногда применяют термин «специальная металлургия».

К переплавам относят вакуумный индукционный (ВИП), вакуумный дуговой (ВДП), электрошлаковый (ЭШП), электронно-лучевой (ЭЛП) и плазменно-дуговой (ПДП) переплавы. Вакуумная индукционная и дуговая плавка были рассмотрены выше (см. гл. 2).

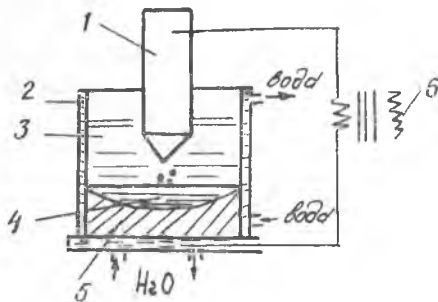


Рис. 9. Схема ЭШП: 1 — расходуемый электрод; 2 — кристаллизатор; 3 — шлак; 4 — ванна металла; 5 — слиток; 6 — источник питания

ка, очищаются от неметаллических включений и кристаллизуются. Применяют флюс, в состав которого входят CaF_2 (основа) и добавки Al_2O_3 и CaO .

Преимущества способа: небольшие по размеру капли металла имеют большую контактную поверхность со шлаком и находятся длительное время в контакте с ним. Все это ведет к рафинированию металла [5].

При электрошлаковом переплаве балл по оксидным и сульфидным включениям уменьшается вдвое, растет пластичность сплавов, повышаются механические свойства и ударная вязкость. 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

Электрошлаковый переплав (ЭШП) разработан институтом электросварки имени Е. О. Патона АН УССР. Схема установки показана на рис. 9. Суть способа состоит в следующем. При прохождении переменного тока через слой шлака с большим электрическим сопротивлением выделяется тепло, которое расплавляет расходуемый электрод. Капли металла, проходя через слой шла-

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 направляется на металл (шихту). Принципиальная схема такой установки показана на рис. 10.

В вакуумной камере (10^{-4} — 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) и жаропрочных сплавов и сталей [5].

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 [5].

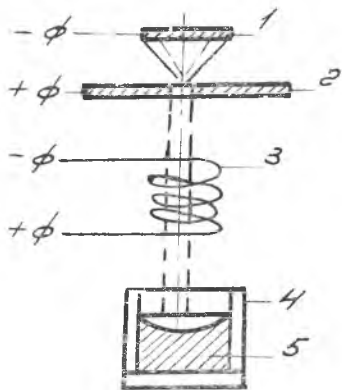


Рис. 10. Схема ЭЛП: 1—катод; 2—анод; 3—фокусирующее устройство; 4—кристаллизатор; 5—слиток

3. ВНЕПЕЧНАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛА

Внепечная обработка состоит в обработке выпущенного из печи металла в ковше (так называемая «ковшовая» металлургия). Обработку ведут следующими способами.

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 обессеривания идут во много раз быстрее, чем в печи. В состав шлака входят CaO и Al_2O_3 . Температура шлака 1650—1700°C.

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

Указанный состав 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, порционное, циркуляционное, струи металла и др. На рис. 11 приведены два способа выпечного вакуумирования: в ковше и в струе металла.

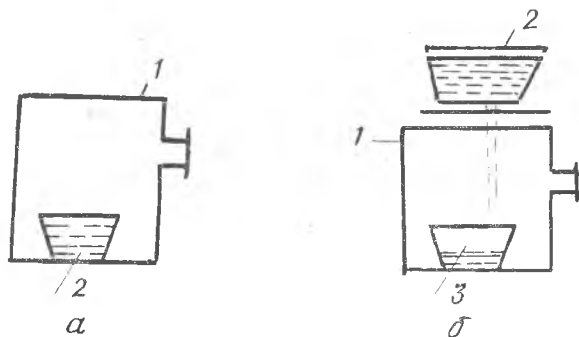


Рис. 11. Схемы способов выпечного вакуумирования: а — в ковше, б — в струе металла: 1 — вакуумная камера; 2 — ковш с металлом; 3 — ковш для вакуумированного металла

Глава 4. НАПРАВЛЕННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

1. МЕТОДЫ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

В основе всех существующих методов лежит принцип отвода скрытой теплоты через растущий кристалл путем теплопроводности. При этом не должно быть такого переохлаждения рас-

плава, при котором будут зарождаться новые кристаллы. Практически это достигается наличием теплового стока, забирающего теплоту от кристалла, и источник тепла, поддерживающий температуру расплава.

В настоящее время наиболее широкое применение нашли следующие методы направленной кристаллизации [6].

Метод Чалмерса (рис. 12). Суть метода заключается в том, что образец металла удлиненной формы расплавляется в горизонтальном контейнере, после чего медленно охлаждается с одного конца.

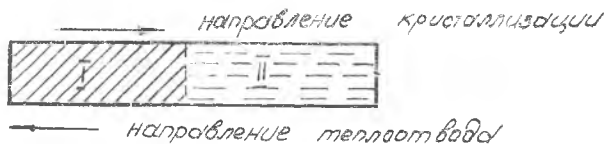


Рис. 12. Схема метода Чалмерса: I — затвердевшая часть; II — расплав

Расплавление металла может осуществляться с помощью перемещающейся печи. После расплавления печь медленно выдвигают, что вызывает кристаллизацию металла с одной стороны. По мере выдвигания печи происходит постепенное затвердевание металла со скоростью 1—10 мм/мин. Процесс можно вести в вакууме или атмосфере инертного газа.

Направленная кристаллизация не всегда приводит к образованию монокристалла, если не принять специальных мер. Поэтому важно получить монокристалльную затравку. Методов получения затравок много, рассмотрим некоторые из них.

При кристаллизации рост кристаллов может происходить из одного или нескольких центров. Монокристалл образуется тогда, когда рост идет из одного центра. На практике применяют приспособления, способствующие зарождению только одного центра. Схема одного из таких приспособлений показана на рис. 13. Рассмотренное приспособление можно с успехом применять для выращивания монокристаллов с низкой температурой плавления и малым значением поверхностного натяжения.

Для металлов с высокой температурой плавления и высоким значением поверхностного натяжения необходимо процесс построить так, чтобы один кристалл рос за счет других, т. е. другие кристаллы выклиниваются. С этой целью надо управлять формой фронта кристаллизации. Известно, что кристаллы растут в направлении, перпендикулярном фронту кристаллизации. Если с помощью специальных мер задать выпуклую по отношению к жидкости форму фронта кристаллизации, то границы между кристаллами начнут расходиться. Здесь один кристалл

вытеснит другие (кристалл 3 на рис. 14). Для использования этого метода необходимо, чтобы отвод тепла через контейнер был значительно меньше отвода тепла через расплав.



Рис. 13. Схема контейнера для зарождения одного центра кристаллизации

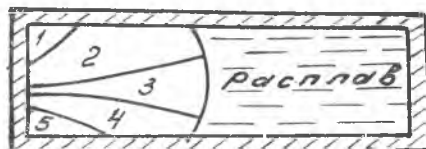


Рис. 14. Образование вогнутого фронта кристаллизации: 1-5 — кристаллы

Часто металлы имеют ярко выраженную анизотропию роста в определенных направлениях. Это обстоятельство может быть использовано для получения затравок. Дело в том, что кристаллы растут не всегда перпендикулярно фронту кристаллизации. При росте из нескольких центров одни из кристаллов более благоприятно кристаллографически ориентированы и поэтому развиваются и растут быстрее других (кристалл 4 на рис. 15).

Для выращивания кристаллов с заданной ориентировкой необходимо использовать затравку. Например, необходимо получить монокристалл с плоскостью (100) по горизонтальной плоскости. Для этого надо использовать затравку. Пусть в затравке плоскость (100) составляет с осью образца угол α (рис. 16).

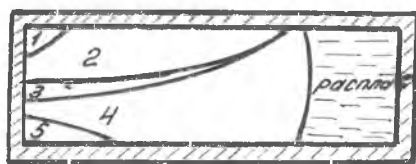


Рис. 15. Преимущественный рост кристалла 4

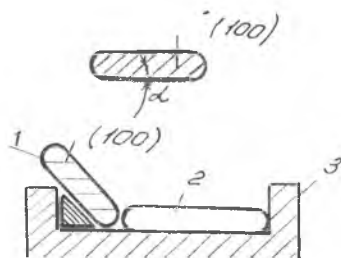


Рис. 16. Выращивание монокристалла с заданной ориентировкой: 1 — затравка; 2 — металл; 3 — контейнер

После установки затравки и металла расплавляется весь металл и конец затравки. Как только произошло соединение расплава с затравкой, печь постепенно выдвигается.

На рис. 17 показано одно из приспособлений для получения монокристаллов.

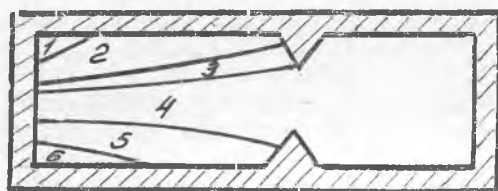


Рис. 17. Приспособление для выращивания монокристалла: 1—6 — кристаллы

Метод Бриджмена (рис. 18). Отличие этого метода от рассмотренного выше состоит в том, что контейнер и печь здесь расположены вертикально. Этот метод позволяет получить монокристаллы квадратного, круглого и других сечений. Главный недостаток метода — затрудненность визуального контроля фронта кристаллизации.

Метод Чохральского (рис. 19). Суть метода сводится к следующему. Затравка погружается в тигель с расплавом, а затем вытягивается вверх. Главное достоинство метода состоит в том, что фронт кристаллизации не касается контейнера.

Метод Пфанна. Этот метод (зонная плавка) подробно рассмотрен в разделе «Зонная плавка».

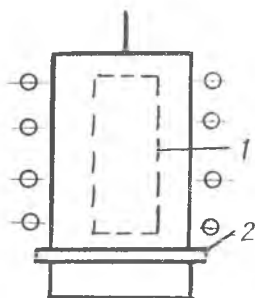


Рис. 18. Схема метода Бриджмена: 1 — форма; 2 — разъемный контейнер

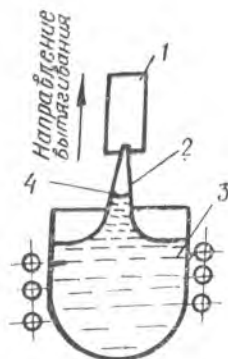


Рис. 19. Схема метода Чохральского: 1 — держатель; 2 — затравка; 3 — тигель с расплавом; 4 — фронт кристаллизации

2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТУРБИННЫХ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК

Технологический процесс литья охлаждаемых лопаток по методу направленной кристаллизации включает следующие основные операции.

Изготовление керамических стержней. Стержни изготавливают запрессовкой стержневой массы в прессформу. В состав массы входят зернистый огнеупорный материал, связующее и пластификатор. В качестве зернистого материала чаще всего применяют электрокорунд. В состав связующего входят двуокись титана (25%) и глинозем (75%). Пластификатор может состоять из парафина (90%) и полиэтилена (10%). Процентное соотношение компонентов стержневой массы: электрокорунд — 96%; связующее — 4%; пластификатор — 15—16% сверх 100%. После изготовления стержни обжигают в газовых печах при температуре 600°C с выдержкой 10—12 час.

Изготовление моделей лопаток. Для изготовления моделей лопаток применяют различные модельные составы, например: карбамид (мочевина техническая) — 90%; селитра калиевая — 10%. Изготовление моделей производится свободной заливкой модельного состава в прессформу. Партия моделей лопаток и литниковая система собираются вместе в модельные блоки.

Изготовление керамических оболочковых форм и подготовка форм под заливку. Огнеупорная суспензия для изготовления керамических оболочек готовится на основе дистен-силлиманита или электрокорунда. В гидролизованый этилсиликат засыпается электрокорунд и перемешивается. Затем на модельные блоки наносится огнеупорная суспензия. Указанная операция выполняется окунанием блоков в суспензию, после чего блок обсыпается электрокорундом. Таким образом наносится необходимое количество слоев керамического покрытия в зависимости от габаритов лопатки. После нанесения каждого слоя производится сушка вакуумно-аммиачным способом с естественной сушкой на воздухе. После удаления модельного состава керамические оболочки прокаливают при температуре 950°C с выдержкой не менее 6 час.

После прокали и охлаждения формы готовят к заливке. В графитовый тигель запрессовывается форма с помощью графитовой засыпки. Затем вставляется в литниковый ход чаши стопор из никелевой фольги, на который устанавливается навеска шихты. На рис. 20 показана форма для литья лопаток методом направленной кристаллизации.

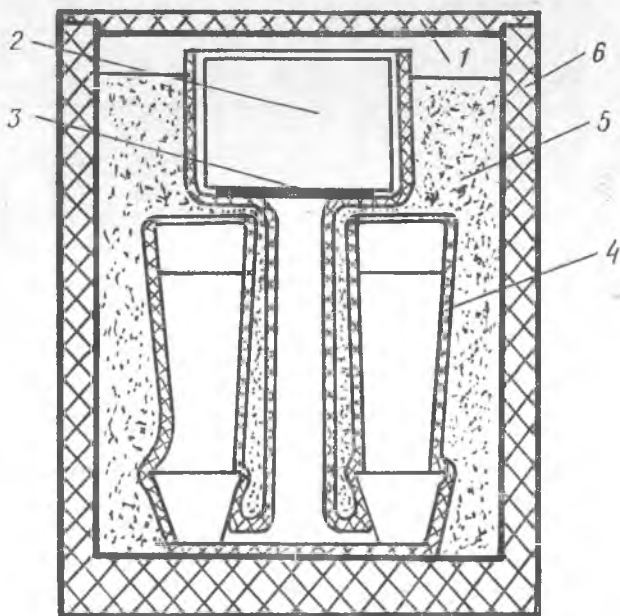


Рис. 20. Форма для литья: 1 — графитовая крышка; 2 — шихтовая заготовка; 3 — никелевая фольга; 4 — керамическая оболочка формы лопатки; 5 — засыпка графитовая; 6 — графитовая опока

Плавка, заливка и кристаллизация лопаток в печи ПМП-2.

На рис. 21 (см. вкладку) приведена схема печи ПМП-2, которая имеет следующие технические характеристики:

Мощность	530 кВт
Максимальная рабочая температура:	
в зоне нагрева	1600°C
в зоне плавления	1700°C
в зоне кристаллизации	1500°C
Остаточное давление	10^{-3} мм рт. ст.
Периодичность загрузки и выгрузки	5—20 мин
Максимальные размеры форм	150×200×500 мм

Печь имеет девять зон с рабочими температурами:

Зоны	$t, ^\circ\text{C}$
Нагрева	1300
	1420
	1520
Плавления	1560
	1560
Кристаллизации	1500
	1500
	1470
	1400

После охлаждения лопаток производится отрезка литников и удаление керамических стержней из лопаток. Последняя операция осуществляется химической обработкой лопаток со стержнями в расплаве бифторида калия. Окончательная операция — контроль лопаток (люм, рентген, геометрия). На рис. 22 показана макроструктура лопаток с равноосной и столбчатой структурой, а в таблицах 4 и 5 — свойства лопаток из сплава ЖС6К.

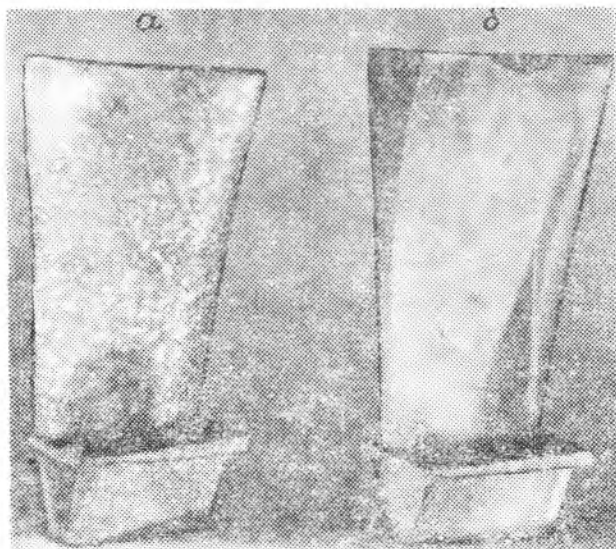


Рис. 22. Макроструктура лопаток с равноосной (а) и столбчатой (б) структурой

Сравнительные данные по механическим качествам лопаток с равноосной и столбчатой структурой (сплав ЖС6К)

Метод отливки	Жаропрочность при 975 °С $\sigma = 20 \text{ кг/мм}^2$ в часах	Пластичность, %		Термостойкость при 900—200—900° в циклах, %	Плотность металла, г/см ³	Выносливость при 900°С кг/мм ² на базе $2 \times 10^7 \sigma^{-1}$
		δ	ψ			
С равноосной структурой	40—80	3	3	1700	8,12	23
Со столбчатой структурой	80—200	6	8	2500	8,15	30

Механические свойства лопаток из жаропрочных сплавов ЖС6К и ЖС6У

Применяемые вакуумные плавильные печи	Структура	σ кг/мм ²	δ , %	ψ , %	Длительная жаропрочность		
					температура испытания, °С	нагрузка, кг/мм ²	
С п л а в ЖС6К							
Порционная индукционная ИСВ-0016	равноосная	85	2	3	975	20	40
	столбчатая	85	6	8	975	23	40
С п л а в ЖС6У							
Порционная индукционная ИСВ-0016	равноосная	85	4	5	975	23	40
	столбчатая	85	12	15	975	25	40

3. ЗОННАЯ ПЛАВКА (ОЧИСТКА)

Получение металлов высокой степени чистоты связано с применением метода зонной плавки. Этот метод позволил получать металлы с содержанием примесей 10^{-4} % и менее. Определение таких малых концентраций примесей производится радиоактивным анализом и измерением электросопротивления. Рассмотрим диаграмму состояния системы А—В (рис. 23).

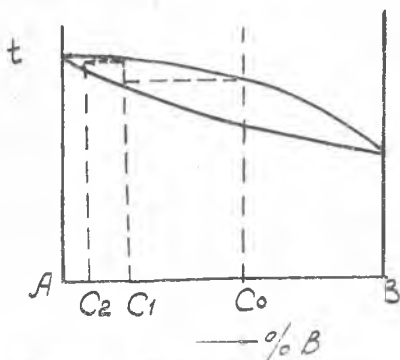


Рис. 23. Диаграмма состояния системы с непрерывным рядом твердых растворов

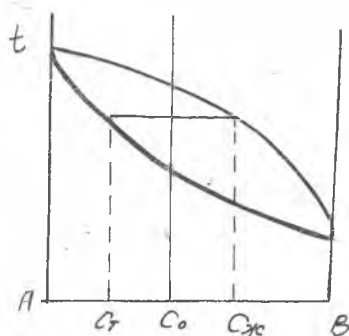


Рис. 24. Определение коэффициента распределения

Первая порция твердой фазы, образующейся из расплава C_0 , содержит C_1 % В. Если же изъять эту первую порцию, расплавить ее и охладить, то первая порция твердой фазы, образовавшаяся из этого расплава, будет иметь состав C_2 . Повторяя эту операцию много раз, можно получить очень чистый металл. Но как это практически сделать? Американский ученый Пфани предложил метод зонной плавки, который является практическим путем, позволяющим отделить первую порцию твердой фазы [6].

Метод основан на том, что концентрации примесей в твердой и жидкой фазах, находящихся в равновесии, различны. Мерой этого различия служит коэффициент распределения K . При этом часто пользуются двумя определениями: 1 — коэффициентом равновесного распределения K_0 — отношением концентрации примеси в твердой фазе к ее концентрации в жидкой, когда обе фазы находятся в равновесии; 2 — коэффициентом эффективного распределения $K_{эф}$ — отношением концентрации примеси в твердой фазе, образовавшейся в тот или иной момент времени, к ее концентрации в основной массе жидкости (рис. 24). Величина K_0 является характеристикой данной системы. При $K_0 > 1$ примеси повышают, а при $K_0 < 1$ понижают температуру плавления растворителя (рис. 25).

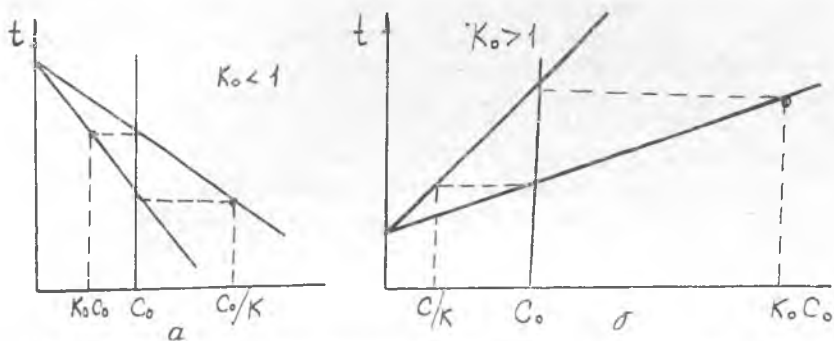
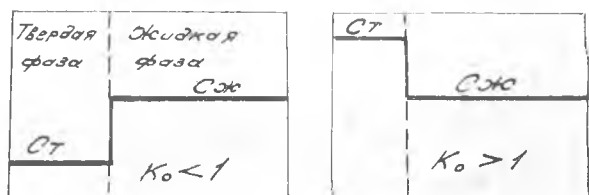
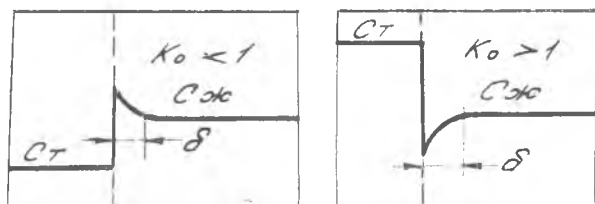


Рис. 25. Части фазовых диаграмм: а — при $K_0 < 1$, б — при $K_0 > 1$

В реальных условиях коэффициент распределения редко достигает равновесного значения. Для простоты в дальнейшем рассматривается случай $K_0 < 1$. Примесь, отталкиваемая образующейся твердой фазой, накапливается перед продвигающимся фронтом кристаллизации (рис. 26). При этом концентрация примеси в твердой фазе равна произведению K на концентрацию примеси в основной массе жидкости, т. е. в объеме расплава,



а



б

Рис. 26. Концентрация примеси при $K_0 < 1$ и $K_0 > 1$ для случаев: а — полного перемешивания расплава ($K = K_0$), б — частичного перемешивания расплава ($K \neq K_0$)

находящегося вне пределов граничного диффузионного слоя толщиной δ (см. рис. 26). K , K_0 и условия кристаллизации можно связать соотношением

$$K/K_0 = 1/\{K_0 + (1 - K_0) e^{-\delta V/D_{ж}}(\gamma_{т}/\gamma_{ж})\},$$

где V — скорость роста;

δ — толщина граничного диффузионного слоя;

$D_{ж}$ — коэффициент диффузии примеси в расплаве;

$\gamma_{т}/\gamma_{ж}$ — отношение плотностей твердой и жидкой фаз.

Так как $\gamma_{т}/\gamma_{ж} \approx 1$, при больших значениях $\delta \cdot V/D_{ж}$ величина $K = 1$, а при малых $K = K_0$; т. е., изменяя δ или V , можно получать значения K в пределах $K_0 \leq K \leq 1$.

Существуют два основных способа проведения контролируемого процесса кристаллизации: 1 — слиток расплавляется целиком, а затем постепенно кристаллизуется с одного конца — это процесс нормальной кристаллизации; 2 — расплавляется только небольшая часть слитка (зона) и эту зону перемещают через остальную часть слитка — зонная плавка. Процесс нормальной кристаллизации был рассмотрен выше (п.п. 1, 2 гл. 4). Схема метода зонной плавки (метода Пфанна) приведена на рис. 27.

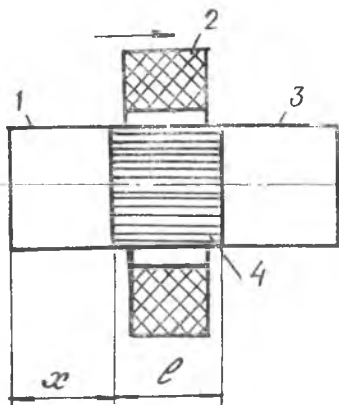


Рис. 27. Схема метода зонной плавки: 1 — твердая фаза; 2 — нагреватель; 3 — нерасплавленная загрузка; 4 — расплавленная зона

Метод зонной плавки более гибок по сравнению с нормальной кристаллизацией. Основные параметры метода: длина зоны l ; исходное распределение примеси в загрузке; условия перемешивания расплава; скорость перемещения зоны.

Степень очистки увеличивается с уменьшением коэффициента распределения K (при $K < 1$), с уменьшением отношения длины зоны к общей длине слитка и с увеличением числа проходов. При этом надо иметь в виду, что в металле могут содержаться примеси, имеющие различные коэффициенты

распределения. Одни примеси (их большинство) понижают температуру плавления ($K < 1$) и будут концентрироваться в конце слитка.

Некоторые примеси повышают температуру плавления ($K < 1$) и будут концентрироваться в начале слитка. Наконец, примеси, имеющие значения, близкие к 1 почти не разделяются, и их кон-

центрация будет определять окончательную чистоту металла.

Случай частичного перемешивания. 1. Однопроходная зонная плавка при постоянных условиях. Пусть слиток имеет постоянное сечение и постоянную по длине концентрацию примеси C_0 , при этом K также постоянно. Тогда результирующее распределение примеси в слитке $C(x)$ после одного прохода зоны определится по Пфанну

$$\frac{C(x)}{C_0} = 1 - (1 - K) \exp \left[- (K \gamma_T / \gamma_K) (x/l) \right].$$

2. Многократная зонная плавка при постоянных условиях. Как распределятся примеси после второго прохода через слиток с распределением примеси, полученным после первого прохода? После первого прохода в слитке возникают начальная и конечная переходные области, в которых $C(x)/C_0$ значительно отличаются от единицы (рис. 28).

При втором проходе содержание примеси в твердой фазе в соответствующих участках слитка будет меньше, чем после первого прохода. Когда фронт кристаллизации будет находиться от конца слитка на расстоянии, равном длине зоны l , наклон кривой распределения примеси будет резко возрастать и область накопления примеси в конце слитка после второго прохода станет длиннее на длину зоны. То же произойдет при каждом последующем проходе. Таким образом, повторные проходы уменьшают концентрацию примеси на начальном переходном участке, увеличивают ее на конечном переходном участке и уменьшают длину промежуточной области.

При загрузке длиной L , начальной концентрации примеси C_0 и длине зоны l конечное распределение примеси C_K после бесконечного большого числа проходов определится соотношением

$$C_K = A \exp Bx,$$

где A -и B находятся из выражений

$$K = Bl / (\exp Bl - 1); \quad A = C_0 Bl / (\exp BL - 1).$$

Применение зонной плавки. Металл, подвергаемый очистке, чаще всего помещают в лодочку из тугоплавкого материала, который не должен загрязнять очищаемый металл. Если же невозможно найти такой материал, применяют метод «плаваю-

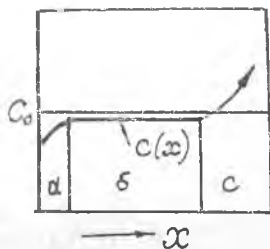


Рис. 28. Распределение примесей по длине слитка X : a и c — начальный и конечный переходные области, b — промежуточная область

шей зоны», т. е. бестигельную зонную плавку. В этом случае слиток помещается вертикально, а расплавленная зона удерживается силами поверхностного натяжения или электромагнитного поля.

Расплавленную зону получают различными способами:

1 — прямой нагрев с помощью кольцеобразной печи вокруг слитка;

2. — индукционный нагрев твч; высокочастотный нагрев обеспечивает эффективный нагрев, электромагнитное перемешивание металла в зоне и сжатие расплавленной зоны (пинч-эффект), который можно использовать при бестигельной плавке;

3 — плавление электронным пучком.

Атмосфера плавки зависит от природы металла и степени очистки. Атмосфера может быть нейтральной (аргон), восстановительной или окислительной (воздух). Так, железо желательно плавить в атмосфере водорода, а алюминий — на воздухе, так как металл покрывается тонкой окисной пленкой, изолирующей его от тигля. При плавке в вакууме происходит дополнительная очистка от летучих примесей.

В настоящее время зонной очистке подвергают многие металлы (алюминий, железо, уран, цирконий, медь и др.).

Глава 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТОГО КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Авиационная промышленность характеризуется частой сменной вида изготавливаемых изделий и высокими требованиями, предъявляемыми к качеству заготовок. Это обуславливает необходимость разработок новых методов изготовления дешевой высокостойкой оснастки для кузнечно-прессового производства.

Изготовление штампов методом литья позволяет существенно уменьшить трудоемкость при механической обработке и снизить стоимость литого инструмента. Однако изготовление штампового инструмента крупных размеров, имеющих вес свыше 300 кг, связано с рядом трудностей.

С увеличением веса литого инструмента замедляется процесс кристаллизации и происходит процесс развития физической, химической и структурной неоднородности, снижаются механические свойства по сечению отливки, что, в итоге, сдерживало внедрение в практику литого штампового инструмента.

При производстве крупногабаритных литых штампов наиболее актуальной задачей является получение мелкозернистой

структуры, сокращение зоны столбчатых кристаллов с целью выравнивания механических свойств стали в периферийной и центральной части отливки.

За последние годы разработаны и широко используются технологические приемы, влияющие на процесс кристаллизации, обеспечивающие получение достаточно мелкозернистой структуры — модифицирование, микролегирование, суспензионная разливка и т. д.

В настоящее время освоен технологический процесс производства литого инструмента из сталей 45ХНМФЛ, 2Х5М2ФЛ и сплавов на основе никеля Х20Н77ТЮР, ЖС6, ЖС6У, ЖС6К и других марок сталей и сплавов.

2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНСТРУМЕНТА

Технологический процесс изготовления литого кузнечно-пресового инструмента включает следующие основные операции:

- изготовление литейной оснастки;
- изготовление литейных форм;
- выплавка стали и сплавов;
- отливка заготовок;
- охлаждение и очистка литых заготовок;
- отрезка литников и прибылей;
- термическая обработка заготовок;
- контроль литых заготовок.

Изготовление литейной оснастки. При проектировании литейной оснастки необходимо учитывать линейную усадку в зависимости от марки сплава, габаритов и конфигурации литых заготовок инструмента, величина которой должна быть в пределах 1—2,5%. Припуски на механическую обработку, предусматриваемые в моделях, соответствуют техническим условиям и согласованным с заказчиком чертежам заготовки. Материал для изготовления модельной оснастки — дерево, алюминий или эпоксидная смола. Оснастка для изготовления литейных форм включает: а — модельный комплект верхней полуформы; б — модельный комплект нижней полуформы.

В нижней полуформе происходит оформление отливки с гравиурой штампа, клещевинной и т. д. и располагается литниковая система. Модельная оснастка для нижней полуформы состоит из подмодельной плиты, на которой крепится модель. В верхней полуформе размещена прибыльная часть и часть литниковой системы. Оснастка для изготовления верхней полуформы должна быть закреплена на подмодельной плите.

С целью точного фиксации полуформы при сборке на плитах предусмотрены центрирующие втулки для установки штырей.

Часть отливки, образующая гравюру штампов, выполняется керамическими стержнями, кокилем с керамической облицовкой или керамическими стержнями — вставками, полученными по технологии выплавляемых моделей. Качество поверхности (шероховатость) и геометрические размеры модели должны соответствовать требованиям чертежей на литые заготовки.

Изготовление литейных форм. В зависимости от вида кузнечно-прессового инструмента и технических требований к нему нужно выбрать один из следующих вариантов литейных форм:

комбинированные песчаные формы с керамическими стержнями, оформляющими гравюру инструмента;

комбинированные песчаные формы с оформлением гравюры чугунным кокилем с керамической облицовкой;

комбинированные песчаные формы с оформлением гравюры керамическим стержнем-вставкой, полученным по методу выплавляемых моделей.

Инструмент в комбинированных песчаных формах с керамическими стержнями, оформляющими гравюру, изготавливают следующим образом:

наружные (нерабочие) поверхности инструмента выполняются в песчаных формах, при этом преимущественно применяют жидко-стекляные облицовочные смеси;

облицовочную смесь наносят на модель из расчета получения в уплотненном состоянии слоя толщиной 20—30 мм — для мелких форм; 30—40 мм — для крупных форм;

формы получают на формовочных машинах или в парных опоках с использованием пневмотрамбовки;

по знаковым частям нижней формы устанавливается керамический стержень, правильность расположения которого контролируется шаблоном;

центровка верхней опоки относительно нижней при сборке формы производится по направляющим штырям.

Инструмент в комбинированных песчаных формах с выполнением гравюры чугунным кокилем с керамической облицовкой изготавливают следующим образом.

На плиту с моделью гравюры устанавливают кокиль и через специальные отверстия свободной заливкой заполняют керамической массой. Зазор между кокилем и моделью должен соответствовать толщине требуемого слоя облицовки и быть равным 4—10 мм.

Изготовление инструмента в формах с оформлением гравюры керамическим стержнем-вставкой, полученным по методу выплавляемых моделей, производится следующим образом.

На поверхность гравюры штампа постоянной модели пульверизатором наносят тонкий слой легкоплавкой разделительной смеси, после чего на эту же поверхность наносят 9—10 слоев

огнеупорной суспензии, приготовленной на основе пылевидного кварца с последующей обсыпкой зернистым электрокорундом. После получения необходимой толщины корки модель (с коркой) погружается в кипящую воду, где корка снимается с модели.

Стержень-корку прокаливают при 850—1100°C с выдержкой в зависимости от габаритов корки в течение 1,0—4,0 час. Преимущественно используют щелевые питатели и прибыли с экзотермическим обогревом.

Выплавка стали и сплавов. Для получения инструмента развесом до 400 кг стали и сплавы выплавляют в индукционных печах с основной футеровкой. Для крупных литых заготовок из стали развесом более 400 кг плавку осуществляют в дуговых электропечах с кислой футеровкой окислительным процессом, а из сплавов на никелевой основе — в дуговых печах с основной футеровкой.

Каждая партия шихтовых материалов должна иметь сертификат с указанием вида и марки шихтового материала, номера партии, веса и количества мест. Запрещается использование шихтовых материалов без сертификата, удостоверяющего их качество.

Отливка заготовок. Металл из печей сливают в очищенный стопорный ковш, нагретый до 700—800°C. Температура металла перед выпуском из печи контролируется термпарой погружения и должна соответствовать температуре, указанной в литейном чертеже для каждого сплава заготовки. Металл заливается в формы ровной, короткой (не более 150 мм от дна ковша до литниковой чаши) струей. При заливке не допускается прерыва струи металла.

Охлаждение и очистка литых заготовок. Время охлаждения литых заготовок в формах в зависимости от сплава и развеса устанавливают по литейной технологии. После охлаждения отливки выбивают из форм и очищают от формовочной смеси, стержней, каркасов.

Отрезка литников и прибылей. Литниково-питающие системы стальных заготовок и заготовок, изготовленных из никелевых жаропрочных сплавов, удаляют на анодно-механической пиле, огневой резкой или абразивными кругами. Огневую резку стальных отливок осуществляют после проведения отжига, нормализации или высокотемпературного отпуска.

Термическая обработка литых заготовок. Заготовки из сплавов ЖС6, ЖС6К, ЖС6У, Х20Н77ТЮР термически не обрабатываются. Заготовки из сталей 45ХНМФЛ, 2Х5М2ФЛ подвергают предварительной термической обработке, которая в зависимости от веса и сложности конфигурации, сводится к нормализации, от-

жигу, высокому отпуску. Твердость после такой обработки должна быть не более 250 НВ.

Окончательную термическую обработку и контроль механических свойств осуществляют на предприятии-потребителе.

Контроль литых заготовок. Химический состав определяют для каждой плавки. Литые заготовки подвергают визуальному контролю на отсутствие дефектов, оценивают состояние поверхности и проверяют наличие маркировки. Размеры литых заготовок должны соответствовать требованиям подетальных чертежей и техническим условиям и иметь припуски на механическую обработку в зависимости от типа и назначения кузнечно-прессового инструмента.

Геометрия первой литой заготовки определяется разметкой, а последующие заготовки подвергаются обмеру.

На всех литых заготовках следует ставить клеймо ОТК предприятия-изготовителя, номер плавки, номер детали в соответствии с требованиями чертежей и технических условий.

Глава 6. ПЛАВКА СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО И ФАСОННОГО ЛИТЯ

1. ПЛАВКА НИКЕЛЯ И НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Особенность плавки никеля и его сплавов определяется высокой температурой и склонностью к интенсивному взаимодействию с газами.

Никель растворяет заметное количество кислорода. При содержании в никеле 0,24% кислорода образуется эвтектика Ni—NiO. Для предотвращения насыщения расплава кислородом воздуха плавку ведут под слоем покровного флюса (бой стекла, плавиковый шпат, бура, молотый магнезит со стеклом и др.). Количество флюса — 5—10% от массы шихты. Кроме того, сплав раскисляют. Хорошим раскислителем и дегазатором является углерод, который образует СО. Пузырьки СО, проходя через расплав, дегазируют его и рафинируют от неметаллических включений.

Никель жадно поглощает водород (один объем никеля растворяет до 4—5 объемов водорода). При охлаждении сплава водород выделяется и образует газовую пористость. Одним из источников образования водорода при плавке является плохо подготовленная шихта со следами влаги, масел и других органических веществ. В целях снижения содержания водорода проводят окислительно-восстановительную плавку в две стадии:

1 — расплав насыщают кислородом, который связывает водород в водяной пар. Для этого плавку ведут без флюса и иногда вводят закись никеля. При этом $\text{NiO} + 2[\text{H}] = \text{H}_2\text{O} + \text{Ni}$.

2 — металл раскисляют комплексным раскислителем или одним из элементов (C, Mg, Si, Mn, Al).

Сера является наиболее вредной примесью в никелевых сплавах. Она дает сульфид никеля Ni_2S , который образует с никелем легкоплавкую эвтектику ($t_{\text{пл}} = 644^\circ\text{C}$).

Эвтектика, располагаясь по границам зерен, вызывает хрупкость при холодной и горячей обработке давлением. При содержании 0,002% S никель хрупок при комнатной температуре, а свыше 0,005% S — при горячей обработке. Для устранения вредного действия серы применяют десульфураторы. Они переводят серу из сульфида никеля в другие соединения. Чаще всего для этого применяют $\text{Mg} : \text{Ni}_2\text{S} + 2\text{Mg} = \text{Mg}_2\text{S} + 2\text{Ni}$. Образующийся сульфид магния, как тугоплавкое соединение, играет роль центров в кристаллизации.

При плавке никеля и его сплавов применяют комплексные добавки-раскислители, которые одновременно раскисляют, обессеривают, дегазируют и модифицируют расплав. В их состав входят C, Mg, Mn, Si, Al, Ti. При этом весьма эффективно вводить комплексные раскислители в виде лигатур Ni—C (1,8 — 2,3% C), Ni—Mg (50% Mg) и Ni—Al (50% Al). Количество раскислителя составляет 0,05—0,1% от массы металла. Таким образом, особенность плавки никеля и его сплавов состоит в применении покровных флюсов и комплексных раскислителей [7].

Плавку деформируемых никелевых сплавов ведут в индукционных низкочастотных печах с магнезитовой футеровкой и реже в дуговых печах. Литейные сплавы выплавляют в индукционных высокочастотных печах. Футеровка печей основная или нейтральная. Для футеровки высокочастотных печей применяют смесь состава: 80% магнезита, 8% жидкого стекла и 12% воды.

Жаропрочные никелевые сплавы могут содержать до 30% и более хрома. Основными легирующими элементами этих сплавов являются Ti, Al, W, Mo, Nb, Co и др.

Плавка жаропрочных никелевых сплавов в открытых индукционных печах приводит к образованию плен окислов Cr, Ti, Al, которые резко снижают свойства сплава. Поэтому в настоящее время выплавку жаропрочных никелевых сплавов ведут в вакууме при остаточном давлении 10^{-2} — 10^{-3} мм рт. ст. ($1,33$ — $1,33 \times 10^{-1}$ Па). Для этого применяют вакуумные индукционные печи периодического или полунепрерывного действия. Работа этих печей и особенности в них плавки были рассмотрены выше (см. п. 2 гл. 2).

Деформируемые сплавы разливают в изложницы, литейные — в специальные формы. Для изделий ответственного авиационного назначения применяют вакуумное точное литье по выплавляемым моделям (см. п. 4 гл. 2).

В состав шихты входят материалы высокой чистоты: никель электролитический марок Н0 и Н1, хром марок Х0 и Х1, вольфрам и молибден в штабиках, алюминий А99 (АВ000), титан (губка), кобальт марок К0 и К1, бор в виде лигатуры Ni—В, графит (электродный бой) и др. Особое внимание должно быть уделено подготовке шихтовых материалов. Вся шихта предварительно просушивается. Чистые и сухие отходы должны храниться отдельно по каждой плавке. Недопустимо попадание в шихту легкоплавких металлов.

2. ПЛАВКА И ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ЛИТЬЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Алюминиевые деформируемые сплавы выплавляют в пламенных отражательных печах (емкость до 40 т) и индукционных печах (емкость до 16 т). Применяют два типа индукционных низкочастотных печей: каналные и тигельные. Литейные сплавы плавят в индукционных печах [7, 8].

Приготовление алюминиевых сплавов для заготовительного литья слитков под обработку давлением производится в индукционных каналных печах (типа ИАК). В конце плавки жидкий металл нагревают до 720—740°C и рафинируют флюсом состава 47% KCl, 30% NaCl и 23% 3NaF·AlF₃. Затем металл из печи подают по желобу в миксер. В цехах для заготовительного литья применяют газовые, электрические и вакуумные миксеры. Миксеры оборудуют одной или двумя литейными машинами для отливки слитков. Ниже подробно рассмотрено непрерывное литье алюминиевых сплавов [9, 10].

Известно, что к литым заготовкам предъявляются определенные требования: плотное строение, равномерное распределение легирующих элементов, мелкозернистая структура. Сочетание грубой структуры с ликвацией, наличие пор и раковин резко ухудшают механические и, прежде всего, пластические свойства слитков и полученных из них заготовок и деталей. Качественный слиток можно получить, используя принцип последовательной кристаллизации. Этот принцип был предложен русским инженером А. А. Лавровым и предусматривает рост кристаллов в одном направлении снизу вверх к непрерывно поступающему расплаву. При этом верхние слои жидкого металла играют роль прибылей, т. е. питают нижележащие слои.

Все способы полунепрерывного и непрерывного литья основаны на принципе последовательной кристаллизации. Жидкий

металл поступает в охлаждаемый кристаллизатор с постоянной скоростью, а затвердевший слиток извлекается также с постоянной скоростью. Если через определенное время процесс литья прекращается и готовый слиток удаляют, то этот процесс называют полунепрерывным литьем. Если литье не прекращается, а затвердевший движущийся слиток разрезается на мерные заготовки, то такой процесс называют непрерывным литьем.

Приведенная выше классификация относится к чисто механической стороне вопроса, так как закономерности кристаллизации и тепловые условия одни и те же в обоих случаях. В настоящее время непрерывный процесс применяют для разливки стальных слитков (УНРС), а полунепрерывный — для разливки легких и, в частности, алюминиевых сплавов [10].

Основные закономерности процесса непрерывного литья алюминиевых сплавов. Эти закономерности были сформулированы в основном в работах В. И. Добаткина, В. А. Ливанова, А. И. Вейника и др. В последние годы был разработан и освоен метод непрерывного литья в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Ниже показана схема литья в обычный кристаллизатор скольжения (а) и электромагнитный (б) (рис. 29).

Суть процесса непрерывного литья с формированием слитка электромагнитным полем состоит в том, что пояс жидкого металла, находящийся над затвердевшей частью слитка, поддерживается не стенками формы-кристаллизатора (рис. 29,а), а электромагнитными силами (рис. 29,б). Здесь водоохлаждаемый кристаллизатор скольжения заменен системой, состоящей из электромагнитного индуктора и металлического экрана. При этом индуктор и экран рассчитаны так, чтобы величина и на-

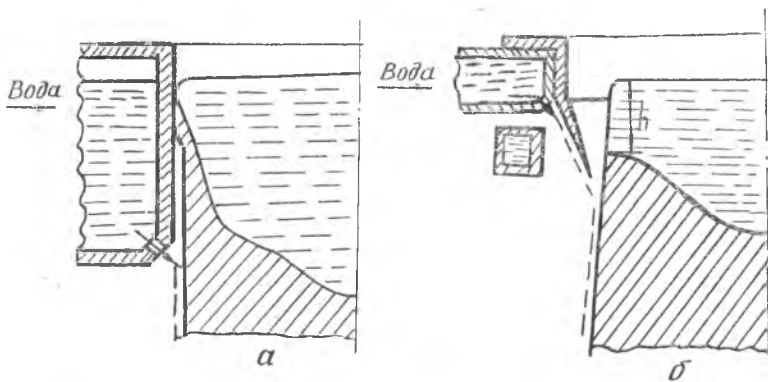


Рис. 29. Схема литья в обычный (а) и электромагнитный (б) кристаллизаторы

правление электромагнитных сил были достаточны для поддержания пояса жидкого металла. В обоих случаях конструкция обеспечивает поступление охлаждающей воды на поверхность слитка.

Литье в ЭМК отличается от литья в кристаллизатор скольжения следующим: 1 — при литье в ЭМК нет контакта между формой и кристаллизующимся слитком; 2 — в ЭМК кристаллизация происходит с принудительным движением жидкого металла в объеме лунки; 3 — расстояние от мениска металла до пояса охлаждения слитка водой — (h) — значительно меньше при литье в ЭМК, чем при литье в кристаллизатор скольжения.

Первая особенность литья в ЭМК является главной, так как отсутствие контакта расплавленного и затвердевающего металла с формой создает другие условия кристаллизации поверхностных слоев. Вторая особенность создает условия для измельчения структуры слитка. Размер твердой корки над поясом непосредственного охлаждения (третья особенность) оказывает определенное влияние на структуру слитка.

Форма и глубина лунки. Постоянство формы поверхности кристаллизации (лунки) — одна из основных закономерностей непрерывного литья. В общем случае лунка имеет форму конуса. В течение всего процесса литья лунка сохраняет свою форму и остается неподвижной относительно заданного уровня. Сказанное выражает закон постоянства формы лунки, который можно выразить формулой

$$v_k = v_d \cdot \cos \alpha,$$

где v_k — скорость кристаллизации, мм/мин ;

v_d — скорость литья слитка, мм/мин ;

α — угол между направлениями движения слитка и кристаллизации.

При литье в ЭМК (в отличие от литья в кристаллизатор скольжения) форма лунки строго повторяет расчетную форму, т. е. вблизи поверхности слитка фронт кристаллизации перпендикулярен поверхности слитка, затем угол наклона фронта кристаллизации к оси слитка уменьшается, а начиная с $(0,35—0,4)R$ снова увеличивается (R — радиус слитка). При литье в кристаллизатор скольжения искажение формы лунки больше всего проявляется вблизи поверхности слитка.

Глубина лунки определяется тремя факторами: скоростью литья, диаметром слитка и теплофизическими свойствами. Глубина лунки при литье в ЭМК подчиняется тем же закономерностям, что и при литье в кристаллизатор скольжения, но она меньше на величину, составляющую значительную долю высоты кристаллизатора. В. И. Добаткин дает следующую рас-

четную формулу для определения глубины лунки при непрерывном литье:

$$h_{\text{л}} = \frac{I \gamma R^2 v_{\text{л}}}{4 \lambda (t_{\text{пл}} - t_{\text{п}})},$$

где γ — плотность металла;

R — радиус слитка;

$v_{\text{л}}$ — скорость литья;

λ — коэффициент теплопроводности;

$t_{\text{пл}}$ — температура плавления;

$t_{\text{п}}$ — температура поверхности слитка;

I — разница в теплосодержании жидкого металла при температуре плавления и твердого металла при температуре, равной $\frac{t_{\text{пл}} - t_{\text{п}}}{2}$.

Скорость кристаллизации и размеры переходной области.

Скорость кристаллизации оказывает большое влияние на структуру и свойства слитка. Обычно кристаллы растут нормально к поверхности лунки. Если поверхность кристаллизации имеет форму правильного конуса, скорость кристаллизации может быть выражена через скорость литья $v_{\text{к}} = v_{\text{л}} \cdot \cos \alpha$.

Скорость кристаллизации может быть определена из соотношения

$$v_{\text{к}} = \frac{A \cdot v_{\text{л}}}{\sqrt{A^2 + v_{\text{л}}^2 \left(r \ln \frac{R}{r} \right)^2}},$$

где

$$A = \frac{\lambda (t_{\text{к}} - t_{\text{сп}})}{\gamma \cdot I};$$

λ — коэффициент теплопроводности;

γ — плотность металла;

$t_{\text{к}}$ — температура кристаллизации, определяемая как

$$t_{\text{к}} = \frac{t_{\text{л}} + t_{\text{с}}}{2};$$

$t_{\text{к}}, t_{\text{с}}$ — соответственно температуры ликвидуса и солидуса;

$t_{\text{сп}}$ — температура охлаждающей воды;

I — разница в теплосодержании слитка при температуре литья и температуре, равной $\frac{t_{\text{к}} + t_{\text{сп}}}{2}$;

r — текущий радиус слитка;

$v_{\text{л}}$ — скорость литья (движения слитка).

При $r \rightarrow 0$ и $r \rightarrow R$ скорость кристаллизации имеет максимумы и $v_{\text{к}} \rightarrow v_{\text{л}}$. Минимальное значение $v_{\text{к}}$ достигает при $r = 0,37 R$

и равно

$$v_k = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{v_d^2} + \left(\frac{0,37 R}{A}\right)^2}}$$

Предельное значение скорости кристаллизации при $v_d = \infty$ определяется уравнением

$$\lim_{v_d \rightarrow \infty} v_k = \frac{A}{r \ln \frac{R}{r}} = v_r,$$

где v_r — горизонтальная скорость кристаллизации стационарного слитка.

Переходная область имеет большое значение для формирования структуры и свойств слитка. В слитке непрерывно литья различают три зоны (рис. 30).

При высоких скоростях литья форму лунки можно считать конической. Для бесконечно большой интенсивности теплообмена (см. рис. 31):

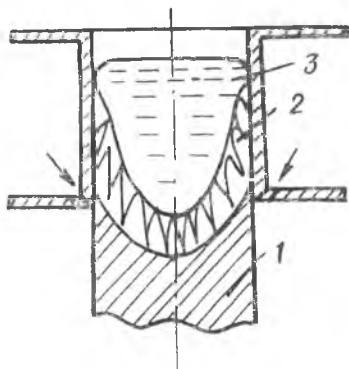


Рис. 30. Твердая — 1; твердожидкая — 2; жидкая — 3 зоны при непрерывном литье

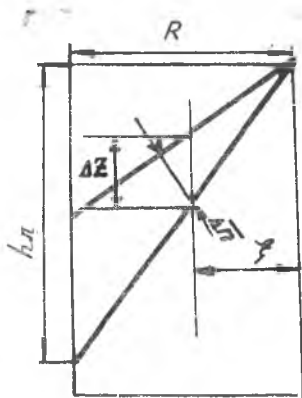


Рис. 31. Схема к выводу формулы для нахождения величины ΔZ

$$\Delta Z = \frac{\Delta t_k \xi}{t_c - t_n} \cdot \frac{dz}{d\xi},$$

где ΔZ — высота переходной зоны;

t_c — температура солидуса;

t_n — температура поверхности;

Δt_k — интервал кристаллизации;

ξ — толщина затвердевшего слоя.

Величина ΔZ может быть найдена из формулы

$$\Delta Z = \frac{\Delta t_c}{t_c - t_n} K \cdot R \cdot v_l \xi,$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Средняя высота переходной зоны по сечению слитка определяется формулой

$$\Delta Z_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_k}{2(t_c - t_n)} K \cdot R^2 \cdot v_l,$$

а средний размер переходной зоны

$$\overline{\Delta n}_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_k}{2(t_c - t_n)} \frac{KR^2 \cdot v_l}{\sqrt{1 + K^2 R^2 v_l^2}},$$

Переходная область для различных диаметров слитка с увеличением скорости литья растет незначительно. При литье в ЭМК размеры переходной области увеличиваются от периферии к центру слитка. При этом увеличение скорости литья в обычный кристаллизатор приводит к увеличению размеров переходной области в периферийных слоях, тогда как при литье в ЭМК она уменьшается.

Зональная ликвация в слитках непрерывного литья. В слитках непрерывного литья может наблюдаться как нормальная (прямая), так и обратная ликвация.

При прямой ликвации обогащены легкоплавкими составляющими средние слои слитка, тогда как при обратной ликвации легкоплавкие составляющие обогащают периферийные слои. На характер и степень ликвации оказывают влияние технологические факторы: условия подачи металла в кристаллизатор, перемешивание металла в лунке, скорость литья, диаметр слитков и др.

В слитках непрерывного литья наблюдается обратная ликвация. Смещение струи металла от центра слитка приводит к смещению минимума содержания меди. При перемещении металла в лунке наблюдается нормальная ликвация. Увеличение скорости литья ведет к уменьшению ликвации и переходу ее в обратную. В табл. 6 показано влияние режимов литья на характер и степень ликвации (сплав Д16), кристаллизатор скольжения).

За степень ликвации принята разность между фактическим содержанием меди в центре слитка и ее средним содержанием в сплаве.

Таким образом, для каждого диаметра слитка есть скорость литья, при которой ликвация в центре равна нулю. При литье в ЭМК по сравнению с обычным кристаллизатором характер ликвации сохраняется, а степень ликвации при литье в ЭМК несколько уменьшается.

Таблица 6

Влияние режимов литья на характер и степень ликвации

Диаметр слитка, мм	Скорость литья, мм/мин	Степень ликвации, %
55	170	+0,16
	220	0
	350	-0,13
70	120	+0,16
	180	-0,08
	250	-0,12
110	113	+0,05
	180	-0,15
168	50	+0,2
	70	-0,03
	130	-0,28
250	50	+0,09
	80	-0,22
	130	-0,38
330	30	+0,05
	35	-0,05
	45	-0,21
	75	-0,28

Слитки, полученные при литье в кристаллизатор скольжения, имеют грубую структуру на расстоянии нескольких десятков миллиметров от поверхности. Структура и свойства слитков, отлитых в ЭМК, монотонно меняются от поверхности к центру в соответствии с изменением скорости кристаллизации и размеров переходной области.

Тепловое и силовое взаимодействие слитка с кристаллизатором.

Тепловое взаимодействие. По характеру теплопередачи кристаллизатор по длине можно разбить на три зоны: 1—непосредственного контакта металла с кристаллизатором; 2—дискретного контакта (начало образования зазора); 3—теплопередачи через газовую прослойку (зазор между кристаллизатором и слитком).

Кроме этого, имеет место передача тепла в осевом направлении и наличие зоны вторичного охлаждения слитка водой.

Теоретические исследования очень сложны, так как определение коэффициента теплоотдачи представляет непреодолимые

Формирование поверхности слитков при литье в ЭМК. Структура слитков. Поверхность слитков, отлитых в ЭМК, в отличие от литья в обычный кристаллизатор, свободна от нестлитин и ликвационных наплывов. Первое объясняется постоянным обновлением пояса жидкого металла над поверхностью кристаллизации. Уровень фронта кристаллизации поверхности слитка практически находится на уровне подачи воды.

Отсутствие ликвационных наплывов на поверхности вызвано отсутствием контакта кристаллизующегося металла с кристаллизатором. А это устраняет разогрев поверхностных слоев, уменьшает размеры переходной зоны и сохраняет неразрушенную окисную пленку на поверхности слитка.

трудности. Экспериментальные исследования показывают, что по длине слитка (в зоне кристаллизатора) отчетливо наблюдаются три зоны охлаждения (сверху вниз): 1 — скорости охлаждения велики (зона контакта слитка с кристаллизатором); 2 — скорость охлаждения резко снижается (образование газового зазора); 3 — скорость охлаждения вновь возрастает (влияние вторичного охлаждения).

При этом скорости охлаждения и расположение зон зависят в значительной мере от скорости литья.

Силовое взаимодействие. Вследствие силового взаимодействия слитка и кристаллизатора на поверхности слитка образуются надрывы и ликвационные наплывы.

Усилие сопротивления вытягивания слитка из кристаллизатора складывается из усилия трения: $F_{тр}$, возникающего от прижатия корочки силами гидростатического давления жидкого металла лунки, $F_{пр}$, возникающего от действия преусадочного расширения корочки, $F_{сх}$, обусловленного наличием мостиков схватывания между корочкой и кристаллизатором, т. е.

$$F_{сопр} = F_{тр} + F_{пр} + F_{сх}.$$

Под действием сил сопротивления в корочке возникают растягивающие напряжения

$$\sigma = \frac{F_{сопр}}{\pi (D - \xi) \xi} \leq \sigma_v,$$

где ξ — толщина корочки в сечении ниже места начала образования усадочного зазора;

σ_v — предел прочности сплава при температуре, соответствующей рассматриваемому сечению;

D — диаметр слитка.

В табл. 7 приведены усилия вытягивания слитка.

Таблица 7

Усилия вытягивания слитка \varnothing 250 мм

Сплав	Усилия вытягивания, кгс	
	в момент пуска литейной машины	при установившемся процессе
Алюминий	45—50	6—7
Д16	120	18—22
АМГ5	250—350	180—200

Трещинообразование в слитках непрерывного литья. Жесткие условия охлаждения при непрерывном литье приводят к формированию термических напряжений. Эти напряжения мо-

гут вызвать появление трещин. В зависимости от условий образования трещины бывают: горячие, возникающие при температурах выше температуры солидуса; холодные, образующиеся при охлаждении слитка до низких температур (процесс сопровождается выбросом металла из кристаллизатора).

В круглых слитках часто возникают центральные трещины (могут быть холодными и горячими), радиальные трещины (как правило, горячие) и реже — круговые трещины. В плоских слитках наиболее распространены поверхностные трещины (горячие) и донные, боковые, головные трещины (холодные).

Конструкция машины непрерывного литья. Литейные машины непрерывного литья состоят из механизма движения слитка и кристаллизатор. При литье в ЭМК кристаллизатор заменен системой, состоящей из индуктора и металлического экрана.

Механизм движения слитка. По способу движения слитка литейные машины бывают с валковым приводом и опускающимся столом. На рис. 32 показана схема машины с валковым приводом (с тянущими роликами).

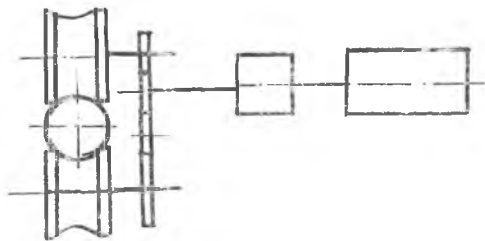


Рис. 32. Схема литейной машины с валковым приводом

В машинах с валковым приводом скорости литья подбирают с помощью шестерен. Их применяют при литье круглых слитков и реже плоских. Недостатки этих машин: невозможность отливать более одного слитка, отсутствие плавного вытягивания слитка, деформация слитка и его овальность.

В машинах с опускающимся столом на конце штока цилиндра помещен поддон, который заходит в кристаллизатор. В зависимости от диаметра отливаемого слитка, устанавливают соответствующий поддон (см. рис. 33,а).

Машины с гидравлическим приводом обеспечивают плавное вытягивание слитка, так как при помощи диафрагмы можно обеспечить любую скорость. На этих машинах можно одновременно вытягивать несколько слитков (4—6 круглых и 2 плоских). Однако размеры отливаемых слитков ограничены здесь величиной хода цилиндра (2,5—3 м для круглых слитков и 1—1,5 м для плоских). Поэтому выход годного здесь невысок (при обрезке нижних концов слитков небольших размеров). Кроме того, сложно изготовление этих машин.

Указанные недостатки машины с гидравлическим приводом были устранены в машинах с механическим приводом. Здесь скорость опускания стола регулируется с помощью переменных шкивов двигателя. Машины снабжены механическим вариатором скоростей с дистанционным управлением. Это позволяет на одной машине отливать слитки всех алюминиевых сплавов, как круглые, так и плоские различных сечений. Система автоматизированного электропривода литейных машин позволяет обеспечить плавное бесступенчатое регулирование скорости литья в диапазоне 25:1, автоматическое поддержание заданной скорости, контроль длины слитка и скорости литья (см. рис. 33,б).

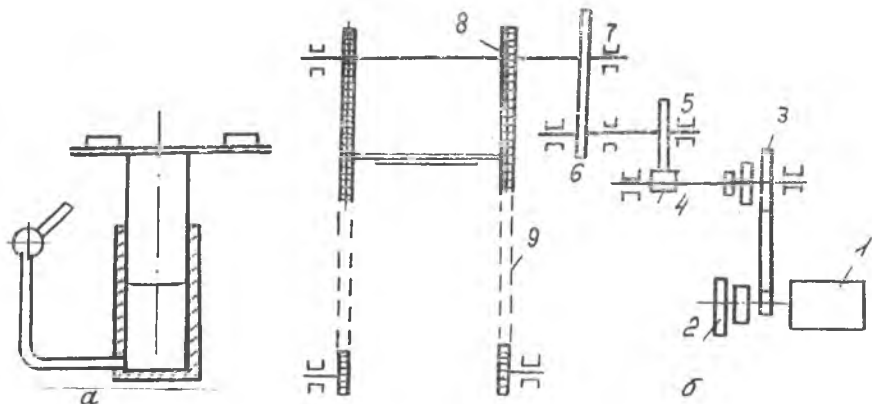


Рис. 33. Схема литейных машин с опускающимся столом: а — гидравлический привод, б — механический привод, 1 — двигатель, 2, 3 — шкивы ременной передачи; 4, 5 — червячная пара; 6, 7 — цилиндрические шестерни; 8 — звездочки, 9 — цепи Галля

Кристаллизаторы являются важнейшей частью литейных машин, они во многом определяют структуру, свойства и качество слитка. Кристаллизатор обеспечивает образование твердой поверхностной корки слитка, которая противостоит растягивающим условиям, давлению жидкой сердцевины, а также образованию зазора. Поэтому к конструкции кристаллизатора предъявляются определенные требования, основными из которых являются следующие:

количество подаваемой воды на слиток должно обеспечить быстрое охлаждение поверхности слитка и отвод тепла, вводимого в кристаллизатор;

обеспечение минимального трения между кристаллизатором и слитком;

уровень жидкого металла в кристаллизаторе должен быть по возможности низким, а перепад струи металла коротким.

При отливке круглых слитков применяют кристаллизаторы скольжения, состоящие из корпуса-охладителя и гильзы-кристаллизатора (рис. 34,а).

Рабочую поверхность гильзы шлифуют и полируют. Для уменьшения образования неслитин на поверхности слитков более 300 мм верхнюю часть гильзы высотой 40—60 мм делают конусной с углом 3—6°.

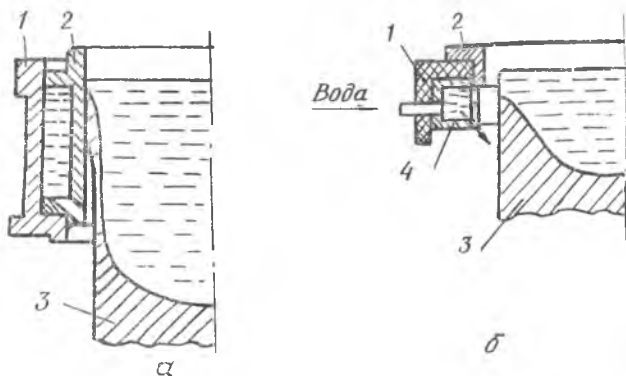


Рис. 34. Схема кристаллизатора скольжения — а и ЭМК — б: 1 — корпус; 2 — гильза; 3 — слиток; 4 — индуктор

Кристаллизаторы для плоских слитков изготавливают из сплава типа АМЦ (необходимость сварки). Рабочую поверхность шлифуют и полируют. При этом применяют рифленую рабочую поверхность, так как это способствует уменьшению теплоотвода и снижению трения. В результате заметно уменьшаются ликвационные наплывы и неслитины.

В кристаллизаторе устанавливается равновесие между количеством тепла, поступающего с расплавом, и количеством тепла, отводимого кристаллизатором и слитком. Поэтому при выборе материала кристаллизатора надо учитывать не только его прочность, но и теплопроводность. Хорошей теплопроводностью обладает авиаль (144—180 ккал/м·час·град). Дюраль имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 104—144$ ккал/м·час·град. Кроме указанных для изготовления кристаллизаторов, могут применяться различные сплавы, например, АК6.

Литье в ЭМК позволяет полностью исключить механическое взаимодействие слитка и кристаллизатора, что обеспечивает высокое качество поверхности слитка. Слитки не имеют неслитин, ликвационных наплывов, надрывов и других дефектов. ЭМК состоит из корпуса, индуктора и экрана (см. рис. 34,б).

Основные технологические параметры непрерывного литья алюминиевых слитков.

Температура литья. Правильный выбор температурного режима литья во многом определяет качество слитка. Обычно температура литья сплавов должна быть на 50—100°C выше температуры ликвидуса. При этом температура металла в печи должна быть такой, чтобы он не успевал заметно охлаждаться при прохождении по различным приспособлениям (желоб, распределительная воронка и т. д.). В табл. 8 приведено соотношение температур в миксере и желобе для некоторых сплавов.

Таблица 8

Соотношение между температурой металла в миксере и желобе

Сплав	Температура металла, °С	
	в миксере	в желобе
Алюминий	720—740	700—720
Авиаль	710—730	690—710
Дюраль	700—720	680—700

При литье в ЭМК температура литья должна быть на 10°C выше температуры литья в обычный кристаллизатор. Рекомендуются частота тока 2500 Гц, а высота пояса жидкого металла 25—35 мм.

Скорость литья. С точки зрения производительности желательны высокие скорости литья. Но увеличение скорости литья ведет к увеличению температурного перепада между центром и периферией слитка, в результате чего формируется неоднородная структура, возникают значительные напряжения. Малые скорости литья приводят к формированию грубой структуры, образованию неслитин. Для дюралей рекомендуется скорость литья, определяемая по формуле

$$v_d = \frac{1,6}{D} \left[\frac{m}{v_{ac}} \right],$$

где D — диаметр слитка, м.

Для легких сплавов $v_d = \frac{2,4}{D}$

При литье в ЭМК скорость литья на 10—20% выше, чем при литье в кристаллизатор скольжения.

В табл. 9 приведены режимы литья в ЭМК, где v_d — скорость литья, мм/мин.

Режимы литья круглых и плоских слитков в ЭМК

Сплав	Тем-ра литья, °С	Ø 190 мм		Ø 290 мм		Ø 330 мм		Ø 480 мм		300 × 1650 мм	
		v _л	u, b	v _л	u, b	v _л	u, b	v _л	u, b	v _л	u, b
АМц, АМг2, АМг3, АМг5, АМг6	690—730	80—100	25—30	65—75	20—24	60—70	25—30	50—60	38—45	65—75	35—40
Д1, АК6, АК8	700—730	90—110	25—30	70—80	20—24	70—80	25—30	35—40	38—45	—	—
Д16	700—730	80—90	25—30	45—55	20—24	40—50	25—30	20—30	38—45	70—90	35—40
АК4	720—740	—	—	50—60	20—24	40—50	25—30	20—30	38—45	—	—
АД1	690—720	120—140	25—30	80—90	20—24	70—80	25—30	50—60	—	75—85	35—40

3. ОСОБЕННОСТИ ПЛАВКИ И РАЗЛИВКИ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Магний характеризуется большой химической активностью. При нагреве и плавлении он бурно окисляется кислородом воздуха с воспламенением. С азотом магний образует соединение Mg_3N_2 . В магнии хорошо растворяется водород (его содержание в твердом магнии может достигать до $20 \text{ см}^3/100 \text{ г}$, а в жидком— $26 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ и выше).

При плавке магниевых сплавов необходимо тщательно изолировать расплав от внешней среды [8]. При этом применение вакуумной плавки невозможно из-за высокой упругости паров магния.

Плавку магния и его сплавов ведут в открытых печах при атмосферных условиях с использованием покровных и рафинирующих флюсов. Флюсы полностью изолируют расплав от окружающей атмосферы. Флюс должен хорошо смачивать и растекаться по поверхности расплава. В промышленности широко применяются хлористые флюсы, содержащие хлориды щелочных и щелочноземельных металлов ($MgCl_2$, KCl , $CaCl_2$, $NaCl$), с добавкой фтористых солей. Разработаны составы бесхлоридных флюсов, в которые входят $3NaF \cdot AlF_3$, AlF_3 , MgF_2 , CaF_2 , B_2O_3 , $Na_2B_2O_7$. Флюсы обладают покровными и рафинирующими свойствами. Рафинирование сводится к очистке расплава от неметаллических включений.

Поэтому плотность флюса больше плотности магния. При осаждении флюса происходит адсорбция неметаллических включений. Это приводит к удалению включений и частиц флюса.

Магниевые сплавы выплавляют в отражательных и индукционных тигельных печах промышленной частоты (типа ИГТ). Так как растворимость железа в магнии мала, плавку ведут в стальных тиглях.

Для шихты применяют чушковой магний, первичный алюминий А5, А6, А7, цинк не ниже марки Ц2, лигатуру $Al-Mn$ и $Al-Mg-Mn$, магниевые сплавы MgC .

При разливке магния и магниевых сплавов струю металла присыпают серным порошком. Сгорая, сера образует защитную атмосферу из сернистого газа.

4. ПРОИЗВОДСТВО ТИТАНОВЫХ СЛИТКОВ И ФАСОННЫХ ОТЛИВОК

Особенности плавки титана обусловлены его специфическими свойствами: высокой химической активностью, взаимодействием с огнеупорными материалами, способностью поглощать газы (O_2 , N_2 , H_2). Поэтому плавку титана и его сплавов ведут в ваку-

уме или в среде инертного газа. Плавка должна обеспечить наименьшее содержание газов в металле. Азот вызывает хрупкость титана. Особенно вреден водород. При содержании тысячных долей процента водорода титан становится хрупким, ударная вязкость падает более чем в два раза.

Содержание кислорода в титановой губке не должно превышать 0,1%, азота — 0,03% и водорода — 0,015%.

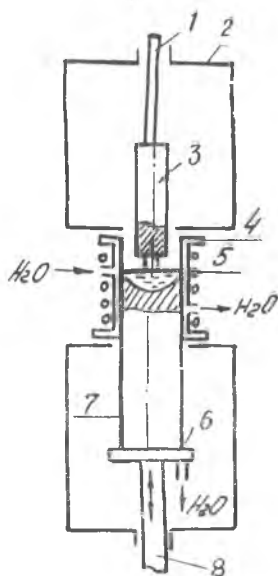


Рис. 35. Схема печи с вытягиванием слитка: 1 — электрододержатель; 2 — вакуумная камера; 3 — расходуемый электрод; 4 — кристаллизатор; 5 — соленоид; 6 — поддон; 7 — слиток; 8 — гидравлический плунжер

Титановые слитки (заготовительное литье) получают в настоящее время в вакуумно-дуговых печах с расходуемым электродом [11—13]. На рис. 35 показана схема печи с вытягиванием слитка. Печи с вытягиванием слитка позволяют получать слитки большой длины, но имеют существенный недостаток.

Значительное трение титана о стенки медного кристаллизатора, малая скорость охлаждения слитка (низкая теплопроводность титана) приводят к надрывам твердой корки титанового слитка, а иногда и к полному разрыву слитка. Поэтому от техники вытягивания слитка пришлось отказаться.

В настоящее время широко применяются печи со стационарной вакуумной камерой и съемно-откатным поддоном, со стационарной вакуумной камерой и съемно-откатным кристаллизатором и со смещаемой вакуумной камерой.

В печах со съемно-откатным поддоном (печи серии ДСВ) после выплавки и остывания слитков на поддоне опускается в крайнее нижнее положение и отводится в сторону, в зону действия мостового крана. Эти печи имеют

значительную высоту, позволяют получать слитки небольшой длины, малопроизводительны.

Поэтому взамен их разработаны печи со съемно-откатным кристаллизатором (печи серии ДТВ). Подъем и опускание кристаллизатора производится гидравлическим механизмом. Отрицательный шинопровод подводится к электрододержателю, а положительный — к вакуумной камере, которая имеет контакт с верхним фланцем кристаллизатора. Такой подвод стабилизи-

рует горение дуги и предотвращает переброс дуги на стенку кристаллизатора.

Печи со смещаемой вакуумной камерой имеют значительно меньшую высоту. Кристаллизатор печи располагают в прямке и сверху устанавливают вакуумную камеру. После выплавки и охлаждения слитка печь разгерметизируется и отсоединяется от вакуумной системы. Затем вакуумная камера поднимается с помощью гидropодъемника и поворачивается на 90° . Кристаллизатор извлекается из прямки на разгрузку, а на его место устанавливается другая. В печах ВД-11 получают слитки диаметром до 1100 мм и длиной 3200 мм (третий переplав).

Важнейшим узлом вакуумных дуговых печей является кристаллизатор. На рис. 36 приведена схема кристаллизатора.

Основная часть кристаллизатора — изложница. Она изготавливается из меди или медных сплавов (хромистая бронза). Снаружи рубашки водяного охлаждения находится катушка соленоида. Верхним фланцем кристаллизатор подсоединяется к вакуумной камере. Кристаллизатор снизу герметически закрыт медным охлаждаемым поддоном. Подвод воды осуществляется к центру поддона, а отвод — через периферию. Вакуумные системы должны обеспечить степень разрежения в зоне горения дуги около 10^{-1} мм рт. ст., а в камере — не менее 10^{-2} мм рт. ст.

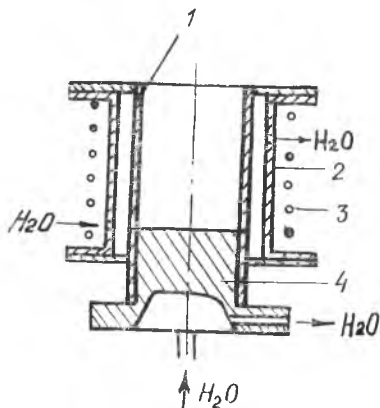


Рис. 36. Схема кристаллизатора:
1 — изложница; 2 — обечайка;
3 — соленоид; 4 — поддон

В состав шихты для производства титановых слитков входят губчатый титан, оборотные отходы (стружка, обрезь, облой), а при выплавке сплавов также и легирующие добавки, чаще всего в виде лигатур.

Расходуемые электроды для первого переplава получают в настоящее время путем прессования. При этом применяют два метода прессования. За рубежом прессование шихты ведут в закрытых штампах и получают бруски небольшой длины различного сечения (квадрат, прямоугольник, трапеция, круг, полу-круг), которые затем собирают в электрод и сваривают. В СССР широко применяется более прогрессивная технология порционного прессования кусковой шихты в расходуемый электрод через коническую проходную матрицу на мощных прессах усилием 10000 тс.

Для фасонного литья применяют гарниссажные вакуумные дуговые печи. Основное отличие этих печей от рассмотренных выше состоит в том, что плавление ведется не в кристаллизаторе, а в тигле. Тигли могут быть металлическими или графитовыми (набивные или точеные). Графитовый тигель устанавливается в водоохлаждаемую обойму, через которую осуществляется охлаждение тигля и подсоединение одного из полюсов питания (рис. 37).

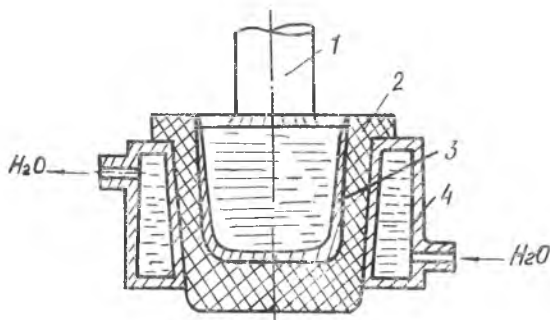


Рис. 37. Схема гарниссажной плавки:
1 — расходный электрод; 2 — графитовый тигель; 3 — гарниссаж; 4 — обойма

На рис. 38 приведена схема гарниссажной вакуумно-дуговой печи.

По способу разливки жидкого металла различают печи: 1 — с донным сливом; 2 — с наклоняющейся камерой; 3 — с наклоном тигля; 4 — с наклоном тигля и электрода; 5 — со сливом металла из тигля через затопляемую летку; 6 — с разливкой жидкого металла по желобу.

На жидкотекучесть титановых сплавов и на заполняемость формы существенное влияние оказывают внешние силы, действующие на расплав. Поэтому при производстве титановых фасонных отливок заливка форм производится центробежным способом. При этом устраняются газовые раковины и улучшаются условия заполнения и питания формы. Обычно применяют сифонный подвод металла. Прибыли устанавливают на боковую часть питаемого узла для того, чтобы металл двигался под действием центробежных сил от прибыли к отливке. Скорость вращения форм составляет от 200 до 1100 об/мин.

При производстве титановых отливок применяют кокили, керамические и графитовые формы, формы, изготовленные по выплавляемым моделям и др. Графитовые формы изготавливают прессованием или по выплавляемым моделям. Керамические

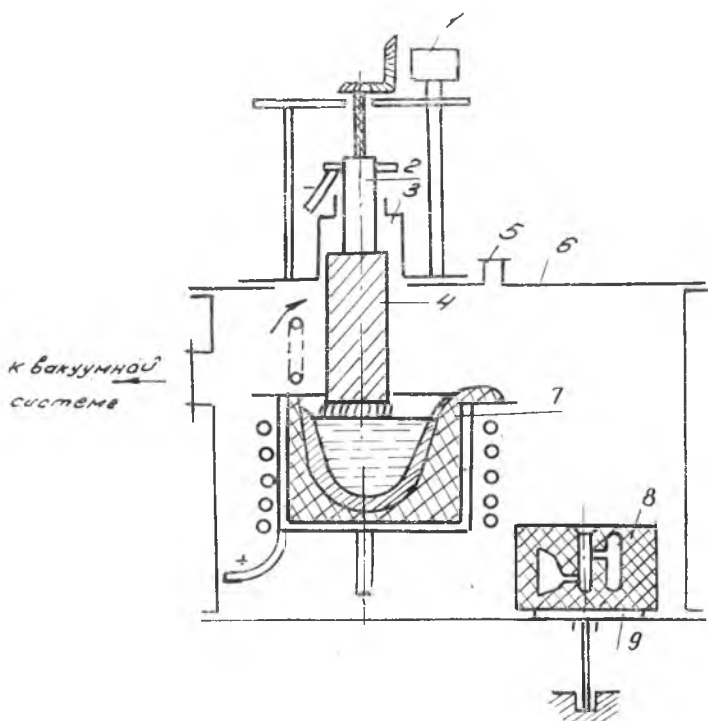


Рис. 38. Схема гарниссажной печи: 1 — привод; 2 — электродо-держатель; 3 — камера; 4 — расходимый электрод; 5 — гляделка; 6 — камера; 7 — тигель; 8 — форма; 9 — центробежная установка

формы можно получать из плавленной окиси алюминия и дву-окиси циркония с титановым порошком.

Таким образом, мы рассмотрели прогрессивные процессы выплавки и литья сталей и сплавов, а также физико-химические процессы при плавке в вакууме, методы направленной кристаллизации, способы получения сталей и сплавов ответственного назначения, особенности плавки цветных металлов.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Вакуумная металлургия / Под редакцией Р. Ф. Бунша. — М.: Иностранная литература, 1959.
2. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. — М.: Высшая школа, 1982.
3. Окорочков Г. Н., Шалимов А. Г., Антипов В. М., Гулин А. И. Производство стали и сплавов в вакуумных индукционных печах. — М.: Металлургия, 1972.
4. Линчевский Б. В. Вакуумная индукционная плавка. — М.: Металлургия, 1975.
5. Воскобойников В. Г., Кудрин В. А., Якушев А. М. Общая металлургия. М.: Металлургия, 1979.
6. Физическое металловедение / Под редакцией Р. Кана. — М.: Мир, 1968, вып. 2.
7. Цыганов В. А. Плавка цветных металлов в индукционных печах. — М.: Металлургия, 1974.
8. Альтман М. Б., Лебедев А. А., Чухров М. В. Плавка и литье легких сплавов. — М.: Металлургия, 1969.
9. Рутес В. С., Аскольдов В. И. и др. Теория непрерывной разливки. — М.: Металлургия, 1971.
10. Ливанов В. А., Габидуллин Р. М., Шипклов В. С. Непрерывное литье алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1977.
11. Неструев А. А., Ходоровский Г. Л. Вакуумные гарниссажные печи. — М.: Металлургия, 1967.
12. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1978.
13. Глазунов С. Г. и др. Применение титана в народном хозяйстве. — Киев: Техника, 1975.

Дополнительная

1. Еднерал Ф. П. Электрометаллургия стали и ферросплавов. — М.: Металлургия, 1977.
2. Шульте Ю. А. Электрометаллургия стального литья. — М.: Металлургия, 1970.
3. Строганов А. И., Рысс А. Н. Электрометаллургия стали и ферросплавов. — М.: Металлургия, 1979.
4. Вайнград У. Введение в физику кристаллизации металлов. — М.: Мир, 1967.
5. Курдюмов А. В., Пикунов М. В., Чурсин В. М. Литейное производство цветных и редких металлов. — М.: Металлургия, 1972.
6. Мариенбах Л. М., Соколовский Л. О. Плавка сплавов цветных металлов для фасонного литья. — М.: Высшая школа, 1967.
7. Сплавы цветных металлов. — М.: Наука, 1972.
8. Добаткин В. И. Слитки алюминиевых сплавов. — М.: Металлургия, 1960.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. ОСОБЕННОСТИ ВЫПЛАВКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ В ВАКУУМЕ	4
1. Стали и сплавы авиационного назначения	4
2. Физико-химические процессы при плавке в вакууме	7
3. Примение законов термодинамики в вакуумной металлургии	9
Глава 2. ВАКУУМНЫЕ НАСОСЫ И ПЕЧИ	14
1. Вакуумные насосы и вакуумметры	14
2. Вакуумные индукционные печи и особенности плавки сталей и сплавов	16
3. Вакуумные дуговые печи и особенности плавки сталей и сплавов	25
4. Вакуумное точное литье жаропрочных сталей и сплавов	29
Глава 3. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	32
1. Обработка металлов вакуумом, инертными газами и порош- кообразными материалами	32
2. Переплавные процессы (ВИП, ДВП, ЭШП, ЭЛП, ПДП)	33
3. Внепечная обработка металла	35
Глава 4. НАПРАВЛЕННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ	36
1. Методы направленной кристаллизации	36
2. Применение метода направленной кристаллизации для произ- водства турбинных охлаждаемых лопаток	40
3. Зонная плавка (очистка)	44
Глава 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛИТОГО КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОГО ИНСТРУМЕНТА	48
1. Общие сведения	48
2. Технология изготовления инструмента.	49

Глава 6. ПЛАВКА СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ЗАГОТОВИТЕЛЬНОГО И ФАСОННОГО ЛИТЬЯ	52
1. Плавка никеля и никелевых сплавов	52
2. Плавка и заготовительное литье алюминиевых сплавов	54
3. Особенности плавки и разливки магниевых сплавов	67
4. Производство титановых слитков и фасонных отливок	67
Л и т е р а т у р а	72

Св. плап 1984, поз. 27

*Рахим Заббаров,
Геннадий Григорьевич Москвичев*

ПРОГРЕССИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ВЫПЛАВКИ И ЛИТЬЯ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ В АВИАСТРОЕНИИ

Редактор Л. М. Балыкова
Техн. редактор П. М. Каленюк
Корректор В. П. Петрова

Сдано в набор 30.05.84 г. Подписано в печать 10.07.84 г.
ЕО 00293. Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная белая.
Литературная гарнитура. Высокая печать.
Усл. п. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,3. Т. 500 экз.
Заказ 509. Цена 20 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. академика С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.

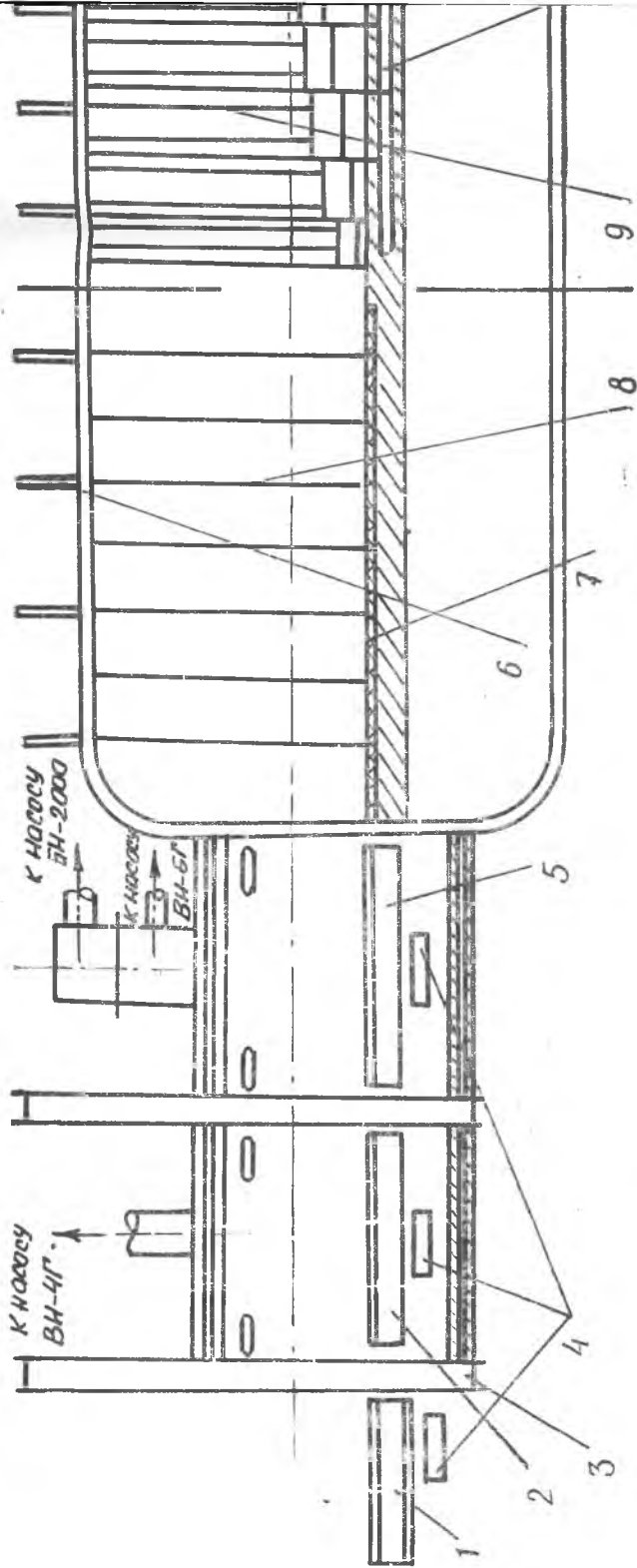
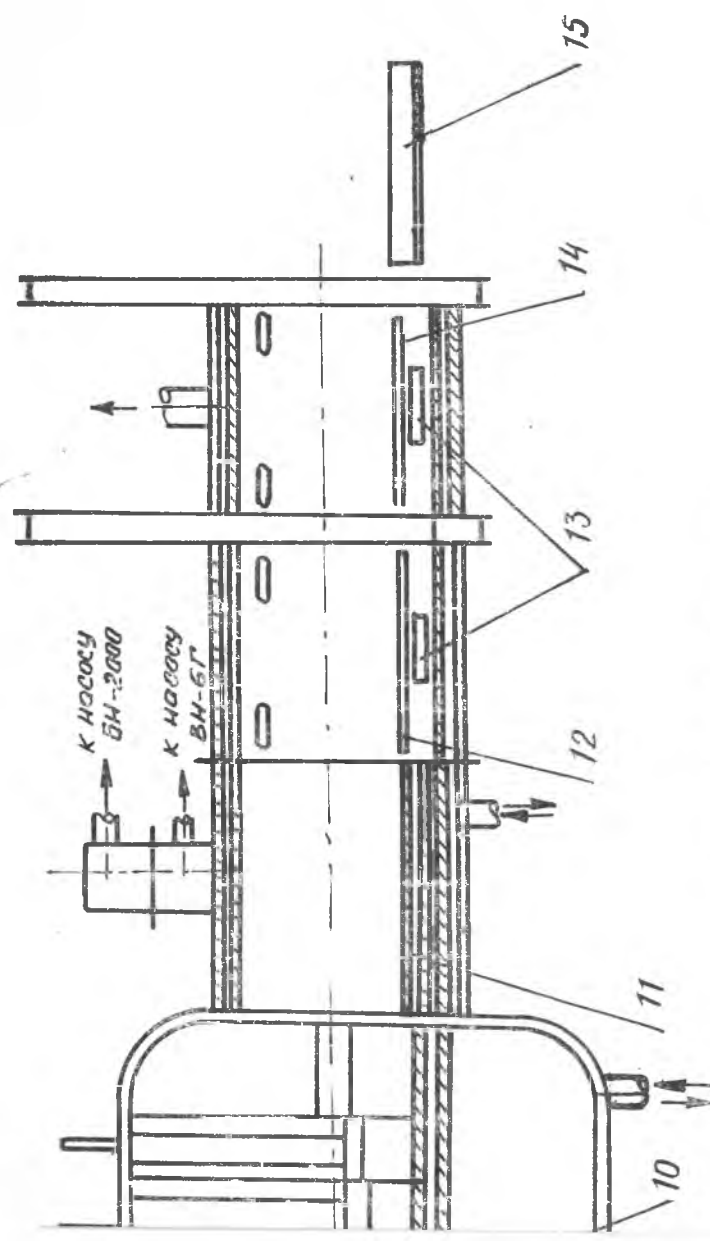


Рис. 21. Схема печи ПМП-2: 1 — стол загрузки с механизмом проталкивания опок; 2 — стол форкамеры с механизмом проталкивания опок; 3 — стол выгрузки с механизмом выталкивания опок; 4 — стол выгрузки с механизмом выталкивания опок; 5 — стол выгрузки; 6 — термонары; 7 — гротели зон кристаллизации; 8 — водоохлаждаемый кристаллизатор; 9 — водоохлаждаемый стол; 10 — при емный стол с вания опок; 11 — стол форкамеры выгрузки с меха низмом выталкивания опок; 12 — стол выгрузки



проталкивания опок; 3 — вакуумные затворы; 4 — гидроцилиндры механизмов подвода сто-
 афтовой направляющая; 8 — нагревательная зона; 9 — нагревательная зона; 10 — котел;
 механизмом выталкивания опок; 13 — гидроцилиндры механизмов подвода воды и выталки-