

Литейное производство

Учебник для ВУЗов

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

Кафедра технологии литейных процессов

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Под общей редакцией профессора В.Д. Белова

3-е издание, переработанное и дополненное

Допущено учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургии в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений, обучающихся
по направлению Металлургия



Москва 2015

УДК 621.74
Л64

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. *В.А. Кечин* (ФГБОУ ВПО «ВлГУ»);
д-р техн. наук, проф. *А.Е. Сёмин*

Авторы:

В.Д. Белов – гл. 14 (совместно с А.Н. Коноваловым); М.В. Пикунов – гл. 1–3; гл. 4 (совместно с В.П. Соловьевым); Э.Б. Тен – гл. 9; гл. 12 (совместно с С.В. Матвеевым); В.П. Соловьев – гл. 4 (совместно с М.В. Пикуновым); А.В. Колтыгин – гл. 7, 16; С.В. Матвеев – гл. 6; гл. 12 (совместно с Э.Б. Теном); С.А. Сироткин – гл. 8, 15; В.А. Горбунов – гл. 10; С.В. Лактионов – гл. 13; Т.А. Базлова – гл. 5; А.Н. Коновалов – гл. 14 (совместно с В.Д. Беловым); А.В. Фадеев – гл. 11

Литейное производство : учеб. / В.Д. Белов [и др.] ; под общ. ред. В.Д. Белова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд. Дом МИСиС, 2015. – 487 с.

ISBN 978-5-87623-892-4

Изложены основы теории литейных процессов, основы технологии изготовления отливок и особенности их производства из чугуна, стали и сплавов цветных металлов. Рассмотрено производство отливок различными способами.

Третье издание (2-е издание вышло в 1987 г.) дополнено сведениями о новых способах получения отливок и процессах структурообразования ряда литейных сплавов.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению 150400 «Металлургия».

УДК 621.74

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава 1. Основы приготовления металлических сплавов	9
1.1. Общие сведения о металлических сплавах.....	9
1.2. Выражение состава сплавов	11
1.3. Физические свойства металлов и сплавов	12
1.4. Взаимодействие металлических расплавов с газами.....	18
1.5. Взаимодействие металлических расплавов с огнеупорными материалами.....	23
1.6. Основы технологии плавки.....	26
Контрольные вопросы	31
Глава 2. Металлические расплавы как жидкости. Заполнение литейных форм. Литниковые системы	33
2.1. неподвижный металлический расплав	33
2.2. Текущий расплав. Заполнение литейной формы расплавом. Литниковые системы	35
Контрольные вопросы	38
Глава 3. Кристаллизация металлов и сплавов.....	39
3.1. Общие закономерности процесса кристаллизации вещества....	39
3.2. Кристаллизация сплавов твердых растворов.....	40
3.3. Образование дендритов. Дендритная ликвация	45
3.4. Кристаллизация сплавов в системе с эвтектическим превращением.....	47
Контрольные вопросы	51
Глава 4. Затвердевание и охлаждение отливок.....	53
4.1. Общие сведения о процессе затвердевания литых заготовок....	53
4.2. Затвердевание отливок из сплавов, не имеющих температурного интервала кристаллизации	54
4.3. Затвердевание отливок из сплавов, обладающих температурным интервалом кристаллизации	55
4.4. Количественные закономерности процесса затвердевания отливок	59
4.5. Структура отливок. Ликвация в отливках	63
4.6. Газы в отливках	67
4.7. Объемная усадка в отливках. Усадочные раковины и поры в отливках	69

4.8. Линейная усадка сплавов и отливок	71
4.9. Напряжения в отливках. Коробление отливок. Трещины в отливках	73
4.10. О поверхности отливок	78
Контрольные вопросы	79
Глава 5. Литейные свойства сплавов.....	81
5.1. Жидкотекучесть.....	82
5.2. Усадка. Расчет и методы определения.....	87
5.3. Горячеломкость	93
Контрольные вопросы	98
Глава 6. Модельное производство	99
6.1. Цели и задачи модельного производства	99
6.2. Модельные комплекты и оснастка	100
6.3. Модельная оснастка для различных типов литейного производства	102
6.4. Металлические модели и их конструктивные элементы	104
6.5. Модельные плиты и крепление на них моделей	109
6.6. Современные способы изготовления модельной оснастки	113
Контрольные вопросы	114
Глава 7. Формовочные материалы.....	116
7.1. Исходные формовочные материалы	119
7.2. Формовочные и стержневые смеси, противопопригарные покрытия	132
Контрольные вопросы	152
Глава 8. Изготовление форм и стержней.....	153
8.1. Ручная формовка.....	153
8.2. Машинная формовка	158
8.3. Импульсное уплотнение смеси	168
8.4. Пескодувный и пескострельный процессы уплотнения	169
8.5. Особенности изготовления стержней.....	177
8.6. Сушка, подсушка и химическое твердение форм и стержней ...	181
8.7. Сборка форм	182
Контрольные вопросы	184
Глава 9. Литниково-питающие системы.....	185
9.1. Устройство литниково-питающей системы и назначение ее элементов.....	185

9.2. Классификация литниковых систем	188
9.3. Расчет литниковых систем	191
9.4. Прибыли	196
Контрольные вопросы	201
Глава 10. Заливка форм. Охлаждение, выбивка и очистка отливок ..	202
10.1. Заливка форм	202
10.2. Охлаждение отливок и выбивка их из форм.....	210
10.3. Обрубка, очистка и термическая обработка отливок.....	214
10.4. Дефекты отливок и их исправление	220
Контрольные вопросы	225
Глава 11. Проектирование технологии изготовления отливок	226
Контрольные вопросы	232
Глава 12. Производство отливок из чугуна.....	233
12.1. Формирование структуры отливок из чугуна.....	233
12.2. Литейные свойства чугуна.....	260
12.3. Плавка чугуна	282
12.4. Отливки из чугуна и технологии их производства	294
Контрольные вопросы	307
Глава 13. Производство отливок из стали.....	308
13.1. Классификация стальных отливок.....	310
13.2. Отливки из нелегированной углеродистой стали	312
13.3. Отливки из легированной стали.....	321
13.4. Отливки из хладостойкой стали.....	336
13.5. Внепечная обработка стали	338
Контрольные вопросы	355
Глава 14. Производство отливок из сплавов цветных металлов.....	357
14.1. Производство отливок из алюминиевых сплавов	357
14.2. Производство отливок из магниевых сплавов	365
14.3. Производство отливок из медных сплавов	371
14.4. Производство отливок из никелевых сплавов	376
14.5. Производство отливок из кобальтовых сплавов.....	379
14.6. Производство отливок из сплавов тугоплавких металлов	380
14.7. Производство отливок из сплавов легкоплавких металлов ...	385
14.8. Производство отливок из сплавов благородных металлов ...	387
Контрольные вопросы	389
Глава 15. Специальные способы литья	390
15.1. Литье в оболочковые формы	391

15.2. Литье по выплавляемым моделям	399
15.3. Литье по газифицируемым моделям.....	408
15.4. Литье в кокиль	412
15.5. Литье под регулируемым газовым давлением.....	420
15.6. Литье под давлением	429
15.7. Центробежное литье	443
15.8. Непрерывное и полунепрерывное литье.....	449
15.9. Электрошлаковое литье.....	455
15.10. Литье с кристаллизацией под давлением.....	457
15.11. Литье выжиманием	461
Контрольные вопросы	464
Глава 16. Цифровые технологии в литейном производстве.....	465
16.1. САПР в литейном производстве.....	467
16.2. Системы компьютерного моделирования литейных процессов	468
16.3. Моделирование фазовых диаграмм состояния.....	473
16.4. Использование технологий быстрого прототипирования в литейном производстве	475
16.5. САМ технологии в литейном производстве	479
16.6. Компьютерные измерительные системы	480
Контрольные вопросы	483
Библиографический список	484

ВВЕДЕНИЕ

Учебник «Литейное производство», написанный авторским коллективом кафедры «Технология литейных процессов» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», переиздается в третий раз: первое издание – 1971 г., второе – 1987 г.

Необходимость в переиздании учебника в первую очередь продиктована большими изменениями, которые произошли и происходят в литейной отрасли России, функционирование которой еще в конце XX в. было ориентировано преимущественно на российские технологии, материалы и оборудование. В настоящее время литейная отрасль практически полностью ориентирована на импорт. Сложившаяся ситуация вносит много минусов в ее развитие непосредственно в нашей стране, однако при этом есть и некоторые плюсы. В частности, как и во всех промышленно развитых странах мира, в России стали интенсивно развиваться цифровые технологии, базирующиеся на 3D-моделях литых деталей и на процессах моделирования структуры и свойств сплавов, заполнения расплавами литейных форм, затвердевания в них отливок, изготовления форм и литейной оснастки методами трехмерной печати и на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

Металлические изделия во всех областях их применения изготавливают самыми разнообразными способами, количество которых постоянно увеличивается. Однако такие способы, как пластическая деформация, резание, сварка, спекание из порошков и литье являются основными. При этом литейная технология, позволяющая получать изделия необходимых конфигураций, размеров и с высокими служебными свойствами при минимальных затратах энергии, материалов и труда непосредственно из расплава, остается наиболее эффективной.

Теория и практика литейного производства на современном этапе позволяют получать отливки массой от нескольких граммов до сотен тонн, с габаритными размерами от нескольких миллиметров до десятков метров, в том числе сложнофасонные тонкостенные литые детали высокого качества, повышенной точности их размеров и повышенным уровнем эксплуатационных характеристик. При этом следует отметить, что на всех этапах литейного производства предпочтительную реализацию находят наукоемкие технологии.

Основная тенденция развития литейной отрасли в настоящее время базируется на ускоренной подготовке производства отливок, которая строится на сквозном цифровом технологическом процессе. Это позволяет не только максимально задействовать инновационные литейные технологии и в некоторых случаях сократить до нескольких суток (1–3 дня) длительность изготовления первой, «пилотной», отливки, но и существенно уменьшить финансовые затраты на запуск в серийное производство новой номенклатуры деталей.

Материал, изложенный в учебнике, будет полезен всем студентам, аспирантам и специалистам как изучающим литейное производство, так и работающим в нем.

Авторы выражают признательность инженерам Н.А. Названовой, С.С. Асеевой и Е.А. Герасименко за оказанную помощь в подготовке рукописи к изданию.

Глава 1. ОСНОВЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

1.1. Общие сведения о металлических сплавах

Металлические сплавы представляют собою особый класс веществ. Они состоят из нескольких компонентов – металлов и неметаллов. В сплаве различают *основу* и *легирующие добавки*. Основой считается компонент, имеющий наибольшее содержание в сплаве. Остальные компоненты являются легирующими добавками. Основа сплава определяет его название. Так, различают алюминийевые, медные, цинковые и другие сплавы. Сплавы на основе железа с любыми металлами, а также с кремнием и углеродом, если содержание углерода не превышает 2 %, называют *сталями*. При большем содержании углерода сплав называется *чугуном*. Многие сплавы на основе других металлов имеют исторически сложившиеся названия: томпак, бронза, латунь, мельхиор, нейзильбер, нимоник, силумин, дуралюмин и т.д.

Металлические сплавы в твердом состоянии могут представлять собой один общий твердый раствор всех компонентов, смесь нескольких твердых растворов компонентов с разной кристаллической структурой, смесь твердых растворов и промежуточных фаз, образованных компонентами. Эти промежуточные фазы обычно обозначаются простыми химическими формулами: Fe_3C , $CuAl_2$, Mg_2Zn . Однако необходимо иметь в виду, что молекулы, соответствующие этим формулам, реально не существуют. Правомочность использования указанных формул основана на том, что в кристаллической решетке промежуточных фаз количественное соотношение числа атомов химических элементов соответствует этим формулам. Кроме того, на основе многих промежуточных фаз образуются твердые растворы с большим или меньшим содержанием компонентов, чем определяется формулой; в этих фазах могут также растворяться другие компоненты сплава. Поэтому действительный состав подобных фаз нередко не соответствует формуле.

Кроме основы и легирующих компонентов в сплавах всегда присутствуют примеси, которые могут быть в растворенном состоянии или же находиться в виде нерастворенных взвешенных частиц самостоятельных фаз.

Жидкие металлические сплавы принято называть *расплавами*. Металлические расплавы представляют собой «мутные» жидкости, они содержат очень большое число взвешенных частиц ($10^3 \dots 10^6 \text{ см}^{-3}$) оксидов, сульфидов, карбидов и других соединений размером от долей миллиметра до коллоидных (менее 1 мкм). Как правило, подобные частицы являются упомянутыми примесями.

Различают *черные* и *цветные* сплавы. Сплавы на основе железа (стали и чугуны) называют черными. Сплавы на основе всех других металлов называют цветными. Выделяют также драгоценные и ювелирные сплавы. Таковыми считаются те, в которых основой или легирующими компонентами являются золото, серебро, платина, палладий.

Металлические сплавы, используемые в народном хозяйстве, можно подразделить на две группы: *деформируемые* и *литейные*. Деформируемые сплавы предназначены для получения деформированных полуфабрикатов – поковок, штамповок, различных видов проката: рельсов, профилей (уголков, швеллеров, двутавров), листов, фольги, прутков, проволоки. Из деформируемых сплавов вначале получают слитки – литые заготовки простой формы – цилиндры, параллелепипеды, которые затем деформируют различными способами обработки давлением. Из литейных сплавов получают фасонные отливки, которые после механической обработки используют как детали машин и элементы конструкций. Четкого разделения сплавов на деформируемые и литейные не существует, но, как правило, деформируемые сплавы содержат меньше примесей. Имеется ряд марок сталей, латуней, бронз, которые используют как для получения деформированных полуфабрикатов, так и для производства фасонных отливок. Чугуны являются чисто литейными сплавами, из них изготавливают только фасонные отливки.

Литейное производство как разновидность технологии обработки металлов включает в себя производство фасонных отливок из чугунов, сталей, сплавов цветных металлов, а также слитков из сплавов цветных металлов. Производство слитков из сталей входит в состав металлургического сталеплавильного производства.

Кроме рабочих сплавов, идущих непосредственно на получение фасонных отливок или слитков, в литейном производстве и в металлургии широко используют так называемые *лигатуры*. Лигатурой называют сплав, применяемый только для получения рабочих сплавов.

Лигатура состоит обычно из основы рабочего сплава с добавками одного или нескольких легирующих компонентов рабочего сплава; при этом содержание легирующих компонентов в лигатуре в 10–20 раз больше, чем в рабочем сплаве. Лигатуры на основе железа называют *ферросплавами*. С помощью лигатур удастся надежно и с меньшими потерями ввести в расплав тугоплавкие, окисляющиеся, летучие, дорогие и очень малые добавки.

1.2. Выражение состава сплавов

Состав сплавов выражают различными способами. Наиболее часто при этом указывается массовая доля компонентов сплава, выраженная в процентах. Пусть нужно приготовить 150 кг сплава, содержащего 80 % железа, 17 % алюминия, 3 % углерода. Для этого без учета потерь при плавке необходимо иметь $150 \times 80 / 100 = 120$ кг железа, $150 \times 17 / 100 = 25,5$ кг алюминия, $150 \times 3 / 100 = 4,5$ кг углерода.

В некоторых случаях, особенно в научных исследованиях, состав сплава указывается в молярных долях компонентов, которые также выражаются в процентах. Поэтому всегда необходимо указывать, какие именно единицы измерения используются. Выразим состав вышеуказанного сплава в молярных долях. Для этого необходимо сначала найти число молей каждого компонента в общем массовом количестве сплава, затем определить общее число молей всех компонентов. Отношение числа молей каждого компонента к общему числу молей будет молярной долей этого компонента, которую, так же как и массовую долю, можно выразить в процентах. Для простоты расчетов возьмем 100 г сплава, указанного выше. Очевидно, в этом количестве сплава содержится 80 г железа, 17 г алюминия, 3 г углерода. Число молей каждого компонента находим делением его массы на его же молярную массу. Молярные массы Fe, Al и C соответственно равны 56, 27 и 12 г. Следовательно, число молей компонентов равно: $n_{\text{Fe}} = 80 / 56 = 1,43$; $n_{\text{Al}} = 17 / 27 = 0,63$; $n_{\text{C}} = 3 / 12 = 0,25$; общее число молей $\sum n = 1,43 + 0,63 + 0,25 = 2,31$. Молярные доли компонентов сплава получаются следующими: Fe – $1,43 / 2,31 = 0,62$; Al – $0,63 / 2,31 = 0,27$; C – $0,25 / 2,31 = 0,11$. Состав сплава в молярных процентах таков: Fe – 62 %; Al – 27 %; C – 11 %. Имея состав сплава в молярных долях, можно этот состав изобразить обычной химической формулой. Для рассматриваемого сплава эта формула будет иметь вид $\text{Fe}_{0,62}\text{Al}_{0,27}\text{C}_{0,11}$. Разделив все индексы на наименьший, получим $\text{Fe}_{5,6}\text{Al}_{2,5}\text{C}$.

Такое выражение состава часто используется для сплавов с аморфным строением.

Очень малые содержания компонентов или примесей выражают в миллионных долях – ppm (сокращение английского выражения parts per million); $1 \text{ ppm} = 1 / 1\,000\,000 = 0,0001 \% = 1 \cdot 10^{-4} \%$.

В ГОСТах и технических условиях содержание легирующих компонентов в сплавах всегда указывается в некотором интервале, определяемом верхним и нижним пределами. Содержание основы указывается как «ост.» – остальное, т.е. 100 минус сумма всех легирующих компонентов и примесей. Содержание примесей оговаривается верхним допустимым пределом «не более».

1.3. Физические свойства металлов и сплавов

Производство фасонных отливок и слитков требует в первую очередь создания основ технологии приготовления сплавов, т.е. технологии их плавки. Сделать это невозможно без знания физических и физико-химических свойств жидких металлов и сплавов, без анализа возможных процессов взаимодействия расплава с газами, с огнеупорными материалами и т.д.

Температура плавления во многом предопределяет используемые при плавке виды энергии и условия плавки металла. В табл. 1.1 приведены температуры плавления наиболее широко применяемых металлов и элементов, которые расположены по возрастанию этого свойства.

Температура плавления двойных и тройных сплавов может быть однозначно определена по соответствующим диаграммам состояния. В случае же многокомпонентных сплавов с большим числом добавок необходимо использовать компьютерные программы в Интернете или прибегать к экспериментальным замерам.

При приготовлении сплавов желательно, чтобы температура плавления вводимых добавок была близка к температуре расплава. При введении тугоплавких добавок затягивается плавка, увеличиваются потери металла в результате окисления. Добавки с низкой температурой плавления и кипения могут затеряться в шлаке, испариться, окислиться, особенно если их содержание в сплаве мало (десятые, иногда сотые доли процента). Именно в этих случаях используют лигатуры.

Таблица 1.1

Некоторые физические свойства металлов и элементов

Металл (элемент)	Мольная масса (округленно), г/моль	Температура, °С		Плотность металла, кг/м ³		Изменение плотности при кристаллизации, %	Давление пара при температуре плавления, Па	Удельная теплоемкость в жидком состоянии, Дж/(г·К)	Удельная теплота плавления, Дж/г
		плавления	кипения	твердого при 20 °С	жидкого при температуре кристаллизации				
Sn	119	232	2600	7300	7000	2,8	10 ⁻²³	0,25	60
Pb	207	327	1900	11 400	10 700	3,5	10 ⁻⁴	0,15	24
Zn	65	419	910	7150	6570	4	13	0,48	100
Mg	24	650	1100	1740	1590	5	500	1,36	370
Al	27	660	2500	2700	2380	7	10 ⁻⁶	1,08	400
Cu	64	1083	2500	8960	8000	5,5	0,13	0,50	205
Mn	55	1240	2060	7400	—	—	130	—	—
Si	28	1410	3200	2350	2530	-10	0,13	1,85	1800
Ni	59	1455	2900	8900	7900	5,3	1,3	0,62	290
Fe	56	1540	2900	7870	7000	5	1,3	0,80	270
Ti	48	1670	3100	4500	4100	5	1,3	0,70	350
Cr	52	1870	2500	7250	6300	5	10 ³	—	—
Mo	96	2620	4600	10 200	9300	5	1,3	0,50	340
C	12	~4000	~4000	2360	—	—	10 ⁵	0,40 (ТВ)	—

Плотность металлов и сплавов предопределяет массу заготовки и изделия. Данные о плотности необходимы для определения количества расплава, нужного для заполнения литейной формы. Знание плотностей расплава всех добавок, которые предстоит ввести в сплав, позволяет предвидеть их поведение и рационально проводить плавку. Если добавки обладают меньшей плотностью, чем расплав, они будут всплывать на поверхность, окисляться и ошлаковываться. Если же плотность добавок больше плотности расплава, они будут тонуть в расплаве, и поэтому не удастся надежно проверить, насколько полно они растворились.

Плотность твердых металлов (см. табл. 1.1) и сплавов при повышении температуры уменьшается вследствие теплового расширения материала. При приближении к температуре плавления уменьшение

плотности практически всех металлов и сплавов составляет 3...5 % от значения при 20 °С. Плавление, т.е. переход в жидкое состояние, у большинства металлов сопровождается дальнейшим уменьшением плотности еще на 3...7 %, так что плотность расплава при температуре плавления составляет около 0,9 от ее величины при 20 °С. Исключение из этой закономерности обнаруживается у кремния, который при плавлении уменьшается в объеме, и поэтому его плотность возрастает, а при кристаллизации плотность кремния уменьшается, как видно из табл. 1.1, на 10 %. Кремний ведет себя подобно воде, плотность которой при кристаллизации также уменьшается на 10 %, и образовавшийся лед плавает на поверхности воды. Уменьшение плотности при кристаллизации на 2...5 % испытывают также висмут, сурьма и некоторые другие металлы и элементы.

Повышение температуры всех жидких металлов и сплавов сопровождается уменьшением плотности, при этом температурный коэффициент изменения плотности расплава в 2–3 раза больше, чем твердого металла.

Плотность сплавов $\rho_{\text{спл}}$ в твердом или жидком состоянии при температуре t в первом приближении может быть вычислена по плотностям чистых металлов-компонентов A, B, C, D и т.д. ($\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_D$) при указанной температуре t и по их содержанию в массовых процентах (x_A, x_B, x_C, x_D):

$$100/\rho_{\text{спл}} = x_A/\rho_A + x_B/\rho_B + x_C/\rho_C + x_D/\rho_D.$$

Изменение плотности металлов и сплавов с изменением температуры имеет очень большое значение для технологии получения литых заготовок. Увеличение плотности при охлаждении расплава и его кристаллизации, выражающееся в уменьшении объема, предопределяет так называемую *объемную усадку*, которая проявляется в понижении уровня расплава в литейной форме и образовании в отливке пустот – усадочных раковин и пористости. Рост плотности и соответствующее уменьшение объема металла или сплава в твердом состоянии приводят к сокращению линейных размеров литой заготовки, т.е. к *линейной усадке*. Предупреждение образования в отливке усадочных раковин и пористости достигается созданием соответствующих условий охлаждения при затвердевании и размещением на теле отливки специальных литейных приливов – *приблелей*, которые должны затвер-

девать последними и в которых должны сосредоточиться усадочные раковины. Прибыли удаляются при черновой обработке отливки. Получение отливки с заданными чертежом размерами достигается учетом линейной усадки путем соответствующего увеличения линейных размеров рабочей полости литейной формы.

Как известно, линейная скорость течения жидкостей зависит от свойства, называемого *динамической вязкостью* и измеряемого в системе СИ единицами Па·с. Динамическая вязкость воды равна ~1 мПа·с, у металлических расплавов она составляет 3...5 мПа·с. Несмотря на эту разницу, визуально кажется, что металлические расплавы льются «как вода».

Очень важно, чтобы при плавке получился однородный по составу расплав. Для обеспечения этого он должен перемешиваться по мере введения легирующих добавок и их растворения. Естественный массоперенос в металлической жидкости, определяемый коэффициентом диффузии, совершенно недостаточен для выравнивания состава даже в малых объемах (менее 1000 см³) при лабораторных плавках. Перемешивание осуществляется специальным плавильным инструментом или обеспечивается конструкцией плавильных печей.

Давление пара металлов. Как видно из табл. 1.1, указанные в ней металлы и неметаллы обладают резко различной величиной давления пара при своей температуре плавления и различной температурой кипения, т.е. температурой, при которой давление пара достигает атмосферного (10⁵ Па). Металлы, у которых большая величина давления пара при их температуре плавления (13 Па и более) и температура кипения сравнительно близка к температуре плавления, называют летучими. В табл. 1.1 таковыми являются Zn, Mg, Mn, Cr и C. Ясно, что эти металлы и сплавы на их основе не следует при плавке значительно перегревать выше точки плавления, так как при этом эти металлы будут заметно испаряться, т.е. теряться, а атмосфера будет загрязняться их парами, как правило, весьма вредными. Например, у цинка температура плавления равна 419 °С, а температура кипения – 910 °С. Жидкий цинк нельзя нагревать выше 650 °С, так как уже при этой температуре давление пара настолько велико, что начинается горение расплава. Образующийся дым состоит из частиц оксида цинка, он выделяется столь интенсивно, что вентиляционные устройства не всегда справляются с большими объемами

загрязненного воздуха, и атмосфера на плавильном участке становится опасной для работников. Ясно, что летучие металлы, сплавы на их основе, а также сплавы, где летучие металлы являются легирующими компонентами, нельзя плавить в вакуумных печах и вообще под пониженным давлением (ниже атмосферного), так как эти металлы будут интенсивно испаряться, т.е. теряться. Не менее сложным (и опасным!) является введение летучих добавок в расплав при открытой плавке под атмосферным давлением. Так, при выплавке высокопрочного чугуна в него необходимо ввести 0,2...0,3 % магния, температура кипения которого равна 1100 °С, а жидкий чугун имеет температуру 1300...1350 °С. Если просто забросить кусок магния в жидкий чугун, этот металл сразу расплавится ($t_{пл} = 650$ °С), но будет находиться на поверхности расплава ($\rho_{Mg} = 1590$ кг/м³, $\rho_{Fe} = 7000$ кг/м³), закипит и загорится. Если магний погрузить в расплав, то вскипевший магний вызовет выброс расплава. Поэтому введение магния осуществляется в специальной изолированной камере, имеющей герметичные затворы и достаточную вытяжную вентиляцию. Специальная штанга внутри камеры действует как механическая рука и погружает магний в расплав. Магний в жидкий чугун можно ввести при плавке на воздухе, если использовать лигатуру никель + 25 % магния. При таком содержании магния взрыва выброса не будет, так как давление пара магния уменьшается пропорционально мольной доле магния в лигатуре.

Сведения о *теплофизических свойствах* металлов и сплавов (теплопроводности, теплоемкости, теплоте плавления) необходимы для расчетов мощности плавильных печей, определения времени плавки заданной массы металла, а также для расчета времени затвердевания всей отливки и отдельных ее частей, для расчетов прогрева литейной формы. В последние годы подобные расчеты проводятся с помощью различных компьютерных программ, в которых введены значения многих физических свойств материалов литейных форм, металлов и сплавов в широком интервале температур. В табл. 1.1 приведены значения теплоемкости жидких металлов вблизи температуры кристаллизации. Теплоемкость твердых металлов составляет 0,85...0,90 от этих значений и всегда увеличивается с ростом температуры.

Сопоставление плотности и теплоемкости металлов и сплавов в твердом и жидком состояниях, а также результаты рентгенострук-

турного анализа свидетельствуют, что в строении твердого и жидкого металла или сплава имеется много общего. В твердом (кристаллическом) состоянии веществ существует так называемый *дальний порядок* во взаимном расположении частиц (атомов, молекул). Расположение любой частицы относительно к другой, произвольно выбранной, характеризуется направлением, расстояние по которому кратно величине межатомного промежутка. В жидком состоянии кристаллическая структура отсутствует, однако около произвольно выбранного центра расположение и число ближайших частиц близко к такому, которое было в твердом состоянии.

Например, в твердом алюминии, имеющем кубическую гранцентрированную структуру, около каждого атома находится 12 ближайших атомов-соседей. В жидком алюминии при 661...665 °С, т.е. недалеко от температуры кристаллизации, число соседей уменьшается до 10–11 и их расположение несколько изменяется. Это состояние называется *ближним порядком*. Объем участка жидкости с ближним порядком называется *кластером*. Кластеры не являются стабильными образованиями, они непрерывно возникают и разрушаются. Кластеры состоят из нескольких десятков атомов. Кроме кластеров в жидком металле имеется бесструктурная жидкость. Чем ближе температура жидкого металла к точке кристаллизации, тем больше число кластеров в объеме расплава и меньше доля бесструктурной жидкости.

Обнаружено так называемое микрогетерогенное строение жидких сплавов, которое характеризуется тем, что состав кластеров отличен от среднего состава сплава; они обогащены некоторыми компонентами и обеднены другими. В двойных жидких сплавах эвтектического состава обнаружены микрогруппировки (кластеры) двух видов. Часть микрогруппировок имеет состав, близкий к составу будущих кристаллов твердого раствора на основе одного компонента, другая часть – близкий к составу кристаллов раствора на основе другого компонента. Указанная микрогетерогенность жидких эвтектических сплавов уменьшается с повышением температуры.

Эти изменения строения расплавов дали основание для разработки специального приема, называемого *высокотемпературной обработкой расплавов (ВТОР)*. В ряде случаев ВТОР дает определенное улучшение механических свойств литых сплавов.

1.4. Взаимодействие металлических расплавов с газами

Газовой средой, с которой соприкасается расплав в ходе плавки и разливки, может быть воздух, т.е. смесь азота и кислорода (4:1 по объему) с примесями влаги, оксидов углерода, углеводородов, оксидов серы, а также специально создаваемая газовая среда из чистого азота, аргона и т.п.

Взаимодействие металлического расплава с газовой средой может выражаться несколькими процессами. Взаимодействие может практически не происходить, так что какие-либо примеси в расплаве появляться не будут, состав и давление газовой среды не будут меняться (если процесс проводится в замкнутом объеме). Примерами подобных случаев может служить плавка любых металлов и сплавов в среде инертных газов (чаще всего, аргона), плавка меди и цинка в атмосфере чистого азота и др.

Взаимодействие может выражаться в образовании химических соединений металл–газ при полном отсутствии растворения газа в металле. Пример такого случая можно видеть при взаимодействии жидких (и твердых) олова, цинка, магния и алюминия с кислородом, приводящем к образованию твердых оксидов SnO_2 , ZnO , MgO , Al_2O_3 в виде плен на поверхности металла при практически нулевой растворимости кислорода в объеме самого металла. В других случаях, напротив, происходит только растворение газа в расплаве без образования каких-либо соединений. Такое явление наблюдается при взаимодействии жидких магния и алюминия с водородом при давлении газа до нескольких атмосфер. Наконец, встречаются случаи, когда взаимодействие начинается с растворения газа в жидком металле. Когда содержание растворенного газа достигает некоторой предельной величины, начинается образование химического соединения. Такое взаимодействие происходит при плавке меди, никеля, железа в атмосфере, содержащей кислород. Вначале кислород просто растворяется в расплаве, а затем начинается образование оксидов, в данном случае жидких Cu_2O , NiO , FeO .

При растворении в металлах газов, состоящих из двухатомных молекул (H_2 , O_2 , N_2), происходит их диссоциация, так что в растворе находятся атомы газов, которые в свою очередь в значительной мере ионизированы из-за ухода части своих валентных электронов в общий

«электронный газ», присущий вообще металлам и обеспечивающий их высокую электро- и теплопроводность. По причине диссоциации молекул на атомы содержание растворенного двухатомного газа в металлах оказывается прямо пропорциональным корню квадратному из давления газа над металлом: $[\Gamma] = k\sqrt{P_{\Gamma_2}}$ (закон Сивертса).

Влияние температуры на содержание в металле растворенного газа более сложно. В ряде систем металл–газ растворение газа в металле является экзотермическим процессом и поэтому при постоянном давлении повышение температуры вызывает уменьшение растворимости газа в металле. Такое явление имеет место при образовании растворов водорода в титане и других металлах IV и V групп Периодической системы элементов Д.И. Менделеева.

В других системах металл–газ растворение газа является эндотермическим процессом, и при повышении температуры металла в твердом состоянии, при плавлении, при перегреве расплава выше точки плавления наблюдается увеличение растворимости газа. Такой процесс происходит при растворении водорода в магнии, алюминии, меди, никеле, железе. Такая же закономерность характерна для растворения азота в никеле и железе. Именно этот случай предопределяет большие трудности и осложнения при получении плотных, без пористости, слитков и фасонных отливок из этих металлов и сплавов на их основе. Если расплав по ходу плавки насыщается газом и в таком состоянии заливается в литейную форму, то по мере снижения температуры и при кристаллизации растворимость газа снижается, газ должен выделиться из раствора, и поэтому возникают газовые пузыри и поры в затвердевающей литой заготовке.

Содержание растворенных в металлах газов принято выражать, кроме обычных единиц (массовая доля, мольная доля, ppm), также в кубических сантиметрах на 100 г металла ($\text{см}^3/100 \text{ г}$). В этом случае весь газ считается находящимся в свободном состоянии в молекулярной форме при давлении 10^5 Па и температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 К). Для перевода обычных единиц в $\text{см}^3/100$ и обратно используется общеизвестная закономерность: 1 моль любого газа (теоретически идеального) при указанных условиях занимает объем 22,4 л ($22\,400 \text{ см}^3$).

В табл. 1.2 приведены данные о взаимодействии жидких металлов с различными газами, а также с углеродом и серой. Эти два элемента

Взаимодействие металлов с газами и газообразующими элементами

Газ или газообразующий элемент	Металл											
	Sn	Pb	Zn	Mg	Al	Cu	Mn	Ni	Fe	Ti	Cr	Mo
Водород	–	–	–	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Кислород	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+	+
Азот	–	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+
Углерод	–	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+
Сера	+	+	–	–	+	+	+	+	+	+	+	+

введены в таблицу потому, что их оксиды нередко входят в состав атмосферы над металлами при плавке. В табл. 1.2 знаком «+» отражено лишь существование раствора газа в жидком и твердом металле без указания количества растворенного газа и без указания на образование химических соединений в системе металл–газ. Знаком «–» отмечено отсутствие практически значимой растворимости газа в металле.

Взаимодействие с водородом. Хотя содержание этого газа в воздухе ничтожно, в металлах водород обычно составляет основную долю растворенных газов. Водород попадает в металлы вследствие разложения влаги, содержащейся в атмосфере и материалах литейной формы, в шихте (всех материалах – металлах, шлаках и флюсах, загружаемых в плавильную печь), в огнеупорных материалах, оформляющих ванну с расплавом. Водород также содержится в атмосфере пламенных печей, работающих на углеводородном топливе, которое активно диссоциирует выше 1000 °С с образованием свободного водорода.

Легкоплавкие металлы **Sn, Pb, Zn практически не растворяют водород**. Растворимость становится значительной, начиная с магния. Растворение водорода в ряду от магния до железа включительно сопровождается поглощением теплоты, поэтому повышение температуры вызывает увеличение содержания газа в растворе, а снижение температуры – его уменьшение. В связи с этим в литых заготовках из этих металлов и их сплавов возможно образование газовой пористости. Содержание растворенного водорода (см³/100 г) при давлении этого газа в 10⁵ Па (1 атм) в металлах при температурах кристаллизации каждого представлено ниже:

Металл.....	Mg	Al	Cu	Ni	Fe
Температура, °С.....	650	660	1083	1455	1539
Твердый металл.....	20	0,05	3	20	12
Жидкий металл.....	30	0,7	5	40	24

Взаимодействие сплавов с водородом определяется их составом. Присутствие в составе сплава металлов, обладающих повышенной растворимостью водорода, вызывает увеличение содержания этого газа в сплаве по сравнению с металлом-основой. Так действует никель в сталях и медных сплавах, магний в алюминиевых сплавах.

Взаимодействие с кислородом. Все металлы, кроме золота и металлов платиновой группы (Pt, Ir и др.), активно взаимодействуют с кислородом. Конечным продуктом взаимодействия являются оксиды. Легкоплавкие металлы от олова до алюминия практически не растворяют кислород. Взаимодействие этих металлов с кислородом сразу приводит к образованию оксидных плен на поверхности расплава. Все остальные металлы способны растворять кислород в определенных количествах, после чего начинается образование соответствующих оксидов. Металлы, растворяющие кислород и обладающие небольшим сродством к кислороду (энергия образования свободных оксидов при заданной температуре невелика), образуют сплавы, которые способны растворять этот газ. Так ведут себя сплавы меди, никеля, железа между собой.

Если же сплавы на основе подобных металлов содержат даже небольшие количества легирующих добавок, обладающих значительно бóльшим сродством к кислороду, растворимость кислорода резко снижается. При взаимодействии с кислородом таких сплавов на поверхности образуются пленки, состоящие из оксидов металла, наиболее активного по отношению к кислороду. Подобным образом ведут себя сплавы на основе железа и никеля с кремнием, титаном, хромом или алюминием, сплавы на основе меди с оловом, цинком, алюминием, кремнием, хромом.

Взаимодействие с азотом. Азот растворяется в металлах с высокой температурой плавления – начиная с марганца. Растворение азота в марганце, никеле и железе сопровождается поглощением теплоты, поэтому понижение температуры вызывает уменьшение растворимости азота в этих металлах. Отсюда возникает вероятность образования газовой пористости, вызванной выделением из раствора азота. В титане и других тугоплавких металлах азот растворяется с выделением теплоты, поэтому растворимость при понижении температуры увеличивается и, следовательно, газовая пористость возникнуть не может.

Растворимость азота в сплавах в общем случае пропорциональна содержанию компонентов, способных растворять азот. Исключение составляют сплавы на основе железа и никеля с добавками алюминия и титана. В этих жидких сплавах при контакте с газовой средой, содержащей азот, образуются твердые нитриды титана и алюминия в виде включений. Для легкоплавких металлов от олова до цинка, всех сплавов на их основе, а также меди и медных сплавов азот является практически нейтральным газом. В магнии и алюминии выше 900 °С возможно образование твердых нитридов этих металлов.

Взаимодействие с парами воды. Подавляющая часть металлов разлагает воду при температуре выше 300...400 °С. Результаты взаимодействия жидких металлов с водой зависят от характера взаимодействия каждого металла с водородом и кислородом (см. табл. 1.2). Если расплав не способен растворять ни водород, ни кислород, то в результате контакта с влагой расплав будет покрываться пленкой оксидов, а водород будет уходить в атмосферу. Так ведут себя олово, свинец, цинк и все сплавы на их основе. Если же расплав не растворяет кислород, но растворяет водород, происходит окисление поверхности расплава и насыщение расплава растворенным водородом. Это характерно для магния, алюминия и всех их сплавов. Если расплав способен растворять и кислород, и водород, то именно это и будет происходить. Конечное равновесие в системе будет определяться парциальным давлением паров воды и содержанием кислорода и водорода в расплаве.

Взаимодействие с монооксидом углерода. Это взаимодействие определяется возможностью протекания следующих реакций: $Me + CO \rightarrow MeO + C$; $Me + CO \rightarrow [Me + O] + C$; $Me + CO \rightarrow [Me + O + C]$. Свинец, олово, цинк и медь восстанавливаются из своих оксидов монооксидом углерода, поэтому СО для этих металлов может рассматриваться как восстановительный или нейтральный газ. Для магния и алюминия СО является окислительным газом, и взаимодействие с ним приводит к образованию нерастворимых оксидов этих металлов на поверхности расплава. Для всех прочих металлов, растворяющих углерод и кислород, согласно табл. 1.2, между атмосферой, содержащей СО, и расплавом устанавливается равновесие, характеризующееся определенным содержанием кислорода и углерода в расплаве. Важным является то, что при понижении температуры это равновесие

сдвигается влево, в сторону образования СО. Следовательно, расплавы этих металлов и их сплавов, содержащие растворенные углерод и кислород, при охлаждении и кристаллизации могут поражаться газовой пористостью, образованной СО. Подобное явление происходит при кристаллизации кипящих деформируемых сталей и литейных углеродистых сталей в случае неполного раскисления.

Взаимодействие с оксидом серы. Взаимодействие с этим газом определяется следующими реакциями: 1) $Me + SO_2 \rightarrow MeO + MeS$; 2) $Me + SO_2 \rightarrow MeO + [S]$; 3) $Me + SO_2 \rightarrow Me + [O] + [S]$.

В случае первой реакции образуются нерастворимые в металле оксид и сульфид. Согласно табл. 1.2 это характерно для цинка и магния. Точно также ведут себя сплавы на основе этих металлов. Образование нерастворимых сульфидов присуще всем металлам II группы Периодической системы элементов Д.И. Менделеева – кальцию, барию, кадмию и др. Вторая реакция приводит к образованию нерастворимого в металле оксида и растворению серы в металле. Согласно табл. 1.2 этот случай характерен для **Sn, Pb, Al и сплавов на их основе**, не содержащих цинк и магний.

Третья реакция предопределяет взаимодействие с сернистым газом SO_2 всех металлов, находящихся правее меди в табл. 1.2. Результатом взаимодействия является загрязнение этих металлов растворенными серой и кислородом. Присутствие в их расплавах небольших количеств металлов II группы (Ca, Mg, Zn) подавляет растворение серы из-за образования нерастворимых сульфидов указанных металлов.

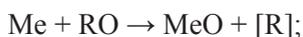
1.5. Взаимодействие металлических расплавов с огнеупорными материалами

Материалы, которыми футеруют плавильные печи и из которых изготавливают плавильные тигли, должны быть механически прочными при высоких температурах и химически стойкими, чтобы выдерживать воздействие металлического расплава, его оксидов, шлака, флюсов.

Огнеупорные материалы могут состоять из смеси оксидов – SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO , Cr_2O_3 , ZrO_2 и др. Наиболее часто используют шамот (60...70 % SiO_2 , 40...30 % Al_2O_3), магнезит (80 % MgO , 20 % CaO), хромомагнезит (50 % MgO , 30 % Cr_2O_3 , 20 % SiO_2), динас (95 % SiO_2 , ост. Al_2O_3 , MgO , CaO), циркон (65 % ZrO_2 , 35 % SiO_2), высокоглиноземистые огнеупоры (более 50 % Al_2O_3 , ост. SiO_2 , MgO , CaO). Самым дешевым и доступным является шамот.

Огнеупорные материалы характеризуются двумя показателями – огнеупорностью, т.е. температурой, при которой материал выдерживает напряжение сжатия в 0,2 МПа, и температурой, при которой наступает полная потеря механической прочности. Естественно, первая температура ниже второй. Наибольшей огнеупорностью (более 1650 °С) обладают динас, магнезит, циркон, наименее огнеупорен шамот – 1300...1400 °С.

Кроме механической прочности при высоких температурах огнеупорные материалы должны обладать *химической стойкостью* – выдерживать воздействие металлических расплавов. Это воздействие можно выразить обменными реакциями между огнеупорным оксидом RO и металлом Me:



В результате обеих реакций происходит разрушение футеровки. Первая реакция сопровождается загрязнением расплава частицами оксидов и растворимой примесью [R]. **Вторая реакция приводит к загрязнению расплава растворимыми примесями [R] и [O].**

Кроме химического взаимодействия огнеупорного оксида собственно с металлом, возможно также взаимодействие огнеупорного оксида с оксидами металла, выражающееся во взаимном растворении. Оценить такое взаимодействие можно по виду диаграммы состояния MeO–RO. Если в этой системе имеются эвтектики, плавящиеся ниже рабочей температуры расплава, то при плавке на воздухе обязательно будет происходить активное разъедание футеровки с образованием шлака.

Легкоплавкие металлы – олово, свинец, цинк – имеют столь низкие температуры плавления, что для их плавки пригодны любые из рассмотренных огнеупорных материалов. При плавке свинца и его сплавов на шамоте при перегревах выше 720 °С возможно оплавление футеровки вследствие того, что в системе PbO–SiO₂ имеется эвтектика с температурой плавления 715 °С.

Если учитывать только огнеупорность материала, то магний и его сплавы с рабочими температурами расплавов до 850 °С можно было бы готовить в печах с шамотной футеровкой. Однако жидкий

магний и все его сплавы активно восстанавливают кремний из кремнезема, поэтому магниевые сплавы готовят только на магнезитовой футеровке или в стальных тиглях. При плавке алюминия и его сплавов на шамотной футеровке также происходит восстановление кремния из кремнезема и растворение его в расплаве, однако этот процесс идет значительно медленнее и, кроме того, во многих алюминиевых сплавах кремний является легирующим компонентом или допустимой примесью.

Медь и обычные медные сплавы (бронзы и латуни) плавят на шамотной футеровке, так как она достаточно механически и химически стойка. Лишь для приготовления сплавов меди с цирконием, хромом, титаном, магнием необходима магнезитовая футеровка.

Плавка сплавов на основе никеля и железа на шамотной футеровке невозможна из-за ее недостаточной огнеупорности, поэтому используют дианас (для углеродистых сталей), магнезит, хромомагнезит, циркон (для легированных сталей, сложных жаропрочных никелевых сплавов).

Для плавки тугоплавких металлов (титана, хрома, циркония, ниобия, молибдена, вольфрама) никакие перечисленные ранее огнеупорные материалы на основе оксидов непригодны по причине недостаточной огнеупорности и активного взаимодействия с расплавом, имеющим температуру более 2000...3000 °С. Поэтому все тугоплавкие металлы плавят в специальных медных водоохлаждаемых тиглях-кристаллизаторах.

В качестве огнеупорного материала для плавки металлов иногда используют графит. Чистый графит пригоден лишь для приготовления сплавов, не растворяющих углерод. Кроме того, необходимо иметь в виду, что выше 700 °С графит на воздухе сгорает. Как добавка в оксидные огнеупоры, графит повышает стойкость материала. Подобным материалом является графитошамот (40...50 % графита, остальное – шамот), широко используемый для изготовления плавильных тиглей.

Расплавы с рабочими температурами до 850 °С можно готовить в стальных и чугунных тиглях. Главная опасность при этом состоит в возможном насыщении расплава железом. Это насыщение нетрудно оценить по диаграмме состояния железо–расплавленный металл.

1.6. Основы технологии плавки

В процессе плавки всегда масса полученного расплава оказывается несколько меньше массы металла, загруженного в печь или тигель. Эти потери при плавке составляют от десятых долей процента до нескольких процентов. Потери связаны с окислением металла, его испарением, взаимодействием с огнеупорной футеровкой.

Весь металл, который загружается в печь для плавки, называется *шихтой*. Шихта может состоять из чистых металлов, полученных с металлургических предприятий, а также отходов и лома, полученных со стороны, собственных отходов в виде бракованной продукции, литников, прибылей, стружки из механических и ремонтных цехов. Все эти материалы загрязнены песком и пылью, т.е. кремнеземом SiO_2 . При плавке образующиеся оксиды металлов сплавляются с кремнеземом, и возникает естественный шлак, содержащий металл в связанном виде. Кроме того, в шлаке имеются капли металла, механически захваченные при перемешивании расплава. Они называются «королевками». Таким образом, часть металла теряется со шлаком. Другая часть потерь связана с испарением металла и взаимодействием расплава с огнеупорной футеровкой. Эти потери можно обнаружить лишь по разности между массой шихты и массой полученного расплава и потерь со шлаком. Поэтому эти потери называют *потерями на угар*.

Перед проведением плавки производят расчет шихты для того, чтобы определить количество шихтовых материалов, необходимое для получения сплава заданного состава в заданном количестве с учетом потерь при плавке. В простейших случаях расчет шихты сводится к решению одного или нескольких уравнений. При сложном составе сплава, большом числе шихтовых материалов и необходимости найти их оптимальный набор из условия наименьшей стоимости, проводят расчеты по специальным компьютерным программам.

Если плавка производится в печи, работающей на сжигаемом топливе (на газе, мазуте), печь обязательно предварительно разогревают. В первую очередь в печь загружают ту шихту, доля которой в общей массе наибольшая, а также наиболее тугоплавкие шихтовые материалы. Легколетучие, активно окисляющиеся и малые добавки следует вводить с помощью лигатур. При необходимости на первую порцию шихты следует сразу же насыпать защитный покровный шлак или флюс. Для надежного растворения всех добавок нужно обя-

зательно перемешивать расплав. При необходимости по окончании плавления проводят раскисление расплава, а также его рафинирование. Заключительной операцией является модифицирование расплава путем введения специальных добавок или температурно-временной обработки. Модифицирование (в переводе на русский язык – видоизменение) выражается, как правило, в измельчении макроструктуры отливки, слитка, либо в измельчении микроструктуры металла. Это сопровождается улучшением технологических свойств металла или улучшением рабочих характеристик конечной продукции (фасонной отливки или деформированного полуфабриката). Перед самой разливкой расплав необходимо выдержать в спокойном состоянии в течение 10...20 мин для отделения (всплывания) частиц шлака, оксидов, газовых пузырьков. Температура расплава перед разливкой в общем случае превышает температуру ликвидуса сплава на 50...100 °С.

Плавка под шлаками и флюсами в общем случае проводится для защиты расплавов от взаимодействия с воздухом. Покровный шлак или флюс должны быть более легкоплавкими, чем расплав, не взаимодействовать с ним и с футеровкой печи и иметь меньшую чем он плотность. Однако соблюсти все перечисленные требования практически невозможно. Для плавки сплавов на основе железа (сталей, чугунов) используют шлаки на основе системы CaO-SiO_2 . Для никелевых сплавов часто применяют более легкоплавкие составы покровных флюсов систем $\text{CaO-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ (обычное стекло) и CaO-CaF_2 , а для медных сплавов – $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ с добавками хлоридов и фторидов натрия, кальция, буры ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). Для магниевых сплавов основной флюсов служит карналлит $\text{KCl}\cdot\text{MgCl}_2$. Алюминиевые сплавы в случае грязной и мелкой шихты (стружки, лома) плавят также под защитой флюсов: KCl-NaCl или карналлит с добавками хлоридов и фторидов натрия и кальция.

В результате взаимодействия расплавов с воздухом и влагой расплавы могут загрязняться растворенным кислородом, азотом или водородом. В случае образования нерастворимых оксидов частицы этих соединений могут замешиваться в расплав, загрязняя его. Расплав может быть загрязнен также каплями шлаков, флюсов, частицами разрушенной футеровки. В самой шихте, как правило, имеется достаточно много загрязнений, часть которых переходит в расплав.

В ходе плавки, как правило, производится *рафинирование* расплавов, т.е. очистка от неметаллических включений (главным обра-

зом оксидов) и растворенных газов. Для удаления неметаллических включений используют несколько приемов. Простейший из них – *отстаивание*. Частицы неметаллических включений, обладающие меньшей плотностью, чем расплав, всплывают к поверхности и переходят в шлак. Отстаиванием могут быть удалены лишь сравнительно крупные частицы размером более 1...3 мм. Мелкие включения (15...20 мкм) практически не отделяются, так как легко переносятся конвективными потоками, наиболее мелкие (менее 2...3 мкм) участвуют в броуновском движении.

Более действенный способ удаления неметаллических включений заключается в обработке расплава *рафинирующими шлаками* или *флюсами*. Расплав перемешивают со шлаком или флюсом. Частицы неметаллических включений либо прилипают к каплям шлака или флюса за счет смачивания, либо просто растворяются в них. После обработки расплав необходимо отстаивать. Рафинирующие шлаки и флюсы отличаются от покровных тем, что они более легкоплавки и содержат оксид натрия Na_2O , фторид кальция CaF_2 , криолит Na_3AlF_6 , которые хорошо растворяют оксидные включения.

Неметаллические включения хорошо отделяются *при продувке расплавов газами*. Мелкие пузырьки газа, проходя через толщу расплава, встречаются с взвешенными частицами, которые прилипают к ним и выносятся на поверхность.

Универсальным и наиболее действенным способом удаления неметаллических включений является *фильтрование* металлических расплавов через зернистые и керамические пористые фильтры. Несмотря на то что диаметр каналов и пор в подобных фильтрах довольно велик (до 1...2 мм), они способны удерживать частицы размером несколько микрометров за счет адгезии (прилипания) включений к поверхности каналов и пор в фильтре.

Рафинирование расплавов от растворенных газов, кроме кислорода, осуществляется *вакуумированием*, *продувкой расплавов другими нерастворимыми в них газами* и *вымораживанием*. Снижая общее давление над расплавами и уменьшая, соответственно, парциальное давление растворенного газа, можно добиться выделения его из расплава в свободном виде. Практически для удаления водорода и азота из сплавов на основе **Mg, Al, Cu, Ni, Fe** **оказывается достаточно понизить** общее давление до 0,1...0,2 атмосферного, т.е. до $(1...2) \cdot 10^4$ Па.

Дегазация расплавов путем продувки нерастворимыми газами основана на том же физическом явлении. Появившийся в расплаве пузырек нерастворимого газа не содержит в себе растворенного газа, иначе говоря, парциальное давление растворенного газа в нем равно нулю. По этой причине газ из раствора переходит в пузырек продуваемого газа, и, таким образом, происходит понижение содержания газа в расплаве. Для продувки металлических расплавов можно использовать аргон (для всех сплавов), азот (для медных и алюминиевых). Для алюминиевых сплавов применяют также летучие хлориды, вводимые в расплав в твердом виде и возгоняющиеся в нем (хлориды алюминия, цинка, марганца), а также гексахлорэтан CCl_6 . Во всех случаях необходимо иметь минимальное содержание влаги в продуваемом газе или летучем хлориде, иначе вместо дегазации может произойти насыщение расплава водородом.

Для дегазации можно использовать прием вымораживания расплава, заключающийся в медленном охлаждении расплава в печи до почти полного затвердевания с последующим быстрым подъемом температуры до нужного уровня. При медленном охлаждении газы (водород, азот) постепенно выделяются из раствора через свободную поверхность и уходят в атмосферу. Нередко проводят предварительную переплавку шихты, загрязненной влагой, маслом, и полученный расплав разливают в чушки. Последующая плавка таких чушек позволяет получать значительно менее насыщенный газом расплав.

Раскислением называют удаление из расплава растворенного кислорода. Раскисление может быть проведено несколькими способами. Наиболее универсальным является так называемое *внутреннее (осадочное) раскисление*, которое заключается во введении в расплав специальных добавок, называемых **раскислителями**, которые связывают кислород в нерастворимые в расплаве соединения. Выбор раскислителя Me' определяется прежде всего возможностью и полнотой прохождения реакции $[Me'] + [O] \rightarrow Me'O$. Раскисление пройдет тем полнее, чем больше будет уменьшение энергии при прохождении указанной реакции. После раскисления в расплаве всегда остается некоторое количество растворенного кислорода и раскислителя. Чем меньше их остаточное содержание, тем выше качество раскислителя.

Выбор раскислителя определяется также видом и состоянием продуктов раскисления. Осадочное раскисление приводит к появлению в

расплаве очень большого количества неметаллических включений – частиц оксидов раскислителя. Эти неметаллические включения должны быть удалены из расплава, что обычно достигается отстаиванием. Наилучшие условия для удаления включений создаются, если они имеют компактную, лучше всего шарообразную форму, и возможно меньшую плотность. Такие условия обеспечиваются, если включения находятся в газообразном или жидком состоянии. Именно по этим причинам для раскисления меди используют фосфор (продукты – пузыри P_2O_5), для никелевых сплавов – углерод (продукты – пузыри CO), для сталей – сложные раскислители, содержащие кремний, кальций, мишметалл (сплав редкоземельных металлов), продукты раскисления – жидкие силикаты. Лишь для завершения раскисления в стали добавляют более сильный раскислитель – алюминий, дающий в расплаве практически неотделяемую взвесь твердых частиц Al_2O_3 .

Раскисление проводят только применительно к расплавам, содержащим растворенный кислород. Поэтому раскисляют углеродистые и низколегированные стали, сплавы железо–никель, никель–медь, чистую медь. Раскисление сплавов железа с большим содержанием углерода, кремния, титана, хрома, сплавов никеля с алюминием, титаном, любых бронз и латуней, всех сплавов на основе алюминия, магния, цинка, свинца, олова никогда не проводят, поскольку в подобных сплавах практически отсутствует растворенный кислород.

Как уже отмечалось, завершающей операцией при плавке является модифицирующая обработка расплава. Сам процесс модифицирования происходит при затвердевании отливок в процессе кристаллизации сплава и выражается в образовании мелкокристаллической структуры. Для достижения этого в расплав в конце плавки вводят специальные модифицирующие добавки или же подвергают его температурно-временной обработке, заключающейся в перегреве с последующим быстрым охлаждением до температуры разливки. Поскольку модифицирующие добавки быстро угорают, а действие перегрева пропадает, модифицирующую обработку проводят в последнюю очередь перед разливкой расплава, чтобы эффект сохранился до конца разливки.

Контрольные вопросы

1. Каково содержание кремния (% масс.) в сплаве, соответствующем по составу формуле Mg_2Si (молярные массы Si и Mg равны 28 и 24 г соответственно)?

2. Удельный объем цинкового сплава $0,00015 \text{ м}^3/\text{кг}$, алюминиевого сплава $0,00036 \text{ м}^3/\text{кг}$. Во сколько раз масса отливки из цинкового сплава превосходит массу той же отливки из алюминиевого сплава?

3. Какие металлы (назвать 5 металлов) будут твердыми при $1500 \text{ }^\circ\text{C}$?

4. Какие металлы и элементы кристаллизуются с увеличением объема?

5. Каково изменение («+» увеличение, «-» уменьшение) удельного объема при плавлении алюминия, висмута, железа, кремния, меди, никеля?

6. Какова основа следующих сплавов: сталь, чугун, бронза, латунь, силумин?

7. Что называется «лигатурой»?

8. Как вычислить состав сплава в молярных процентах (% моль) по известному составу в массовых процентах (% масс.)?

9. Каково содержание примеси (% масс.), выраженное как 10 ppm?

10. Назовите 4–5 «легкоплавких» металлов.

11. Какова температура плавления Mo, Cr, Ti, Fe?

12. Назовите 3 «легких» металла ($\rho \leq 4500 \text{ кг/м}^3$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

13. Назовите 3–4 «тяжелых» металла ($\rho \geq 8000 \text{ кг/м}^3$ при $20 \text{ }^\circ\text{C}$).

14. Вязкость (динамическая η , Па·с) жидких металлов близка к вязкости воды или отличается от $\eta_{\text{H}_2\text{O}}$ в сотни раз?

15. Какие из перечисленных металлов: Mo, Cr, Ti, Fe, Mn, Cu, Al, Mg, Zn, Sn являются «летучими», т.е. обладают при своей температуре плавления давлением пара более 10 Па?

16. Газы (H_2 , N_2 , O_2) растворяется в металлах в молекулярной или атомарной форме?

17. Какие газы растворяются в Fe, Cu, Al, Zn?

18. Каков источник водорода, попадающего в жидкие металлы?

19. В книге указано, что в металле содержание растворенного водорода составляет $2,5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Выразите это содержание в % масс. и ppm.

20. Какие оксиды являются основой огнеупорных материалов, служащих для изготовления плавильных тиглей и для футеровки плавильных печей?

21. Что такое шамот, графито-шамот, карборунд?
22. Как плавят Ti и все прочие тугоплавкие металлы (вид энергии, материал плавильной емкости)?
23. Каковы виды потерь металлов при плавке?
24. Сплав состоит из компонентов А, В, С. Как правильно задать состав этого сплава для его выплавки: 1) А – 60 % масс., В – 30 % масс., С – 10 % масс.; 2) В – 28...32 % масс., С – 11...9 % масс., А – остальное, примеси S, N, O в сумме не более 0,1 % масс.?
25. Как удалить из расплава неметаллические включения?
26. Что такое «раскисление» расплава?
27. Зачем, как и когда проводится операция «модифицирование» расплавов?

Глава 2. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ РАСПЛАВЫ КАК ЖИДКОСТИ. ЗАПОЛНЕНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ. ЛИТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

2.1. Неподвижный металлический расплав

Плотность и вязкость металлических расплавов, как те же свойства воды, не зависят от давления и скорости течения. Поэтому для описания поведения неподвижных и текущих металлических расплавов используют законы гидравлики, науки, как показывает ее название, рассматривающей поведение воды.

В неподвижном расплаве давление p в любой его точке определяется основным законом гидростатики – законом Паскаля:

$$p = p_{\text{вн}} + \rho gh, \quad (2.1)$$

где $p_{\text{вн}}$ – внешнее давление на свободную поверхность расплава;
 ρ – плотность расплава; g – земное ускорение; h – глубина, на которой находится рассматриваемая точка, т.е. расстояние от свободной поверхности.

Действие основного закона гидростатики можно видеть на рис. 2.1, где изображена литейная форма, состоящая из двух частей (говорят «полуформ») и предназначенная для получения отливки – плоской плиты площадью S в горизонтальном положении. Давление (в данном случае говорят «металлостатическое») расплава на верхнюю полуформу определяется формулой (2.1). Однако при любых литейных формах внешнее (атмосферное) давление действует не только на свободную поверхность расплава в стояке (это вертикальный канал, через который производится заливка), но и на всю поверхность расплава, соприкасающегося с литейной формой. Поэтому внешнее давление $p_{\text{вн}}$ следует приравнять нулю, так что давление расплава на верхнюю полуформу по формуле (2.1) равно $p = \rho gh$. Следовательно, сила, создаваемая расплавом и действующая снизу вверх на верхнюю полуформу, равна $Q = pS$. Если сила Q превысит вес верхней полуформы, она будет приподнята и расплав вытечет по стыку (говорят «по разьему») полуформ наружу. Чтобы этого не произошло, верхнюю и нижнюю полуформы либо скрепляют между собой, либо на верхнюю полуформу кладут груз. Поскольку подъемная сила, действующая на

верхнюю полуформу, прямо пропорциональна плотности расплава, опасность подъема верхней полуформы особенно велика при получении отливок из металлов с большой плотностью (чугуна, стали, бронзы и латуни).

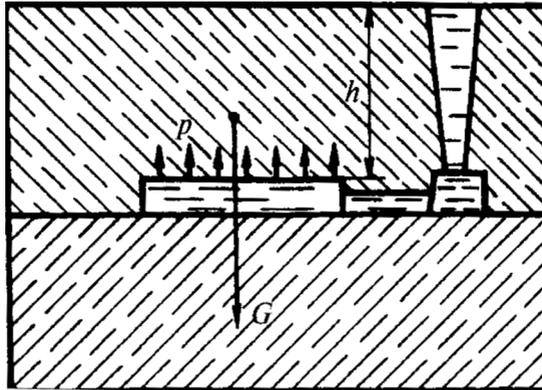


Рис. 2.1. Схема сил, действующих в литейной форме, заполненной расплавом

В неподвижном металлическом расплаве действует закон Архимеда, гласящий, что на тело, находящееся в жидкости, действует сила, направленная в сторону, противоположную направлению действия силы тяжести, и равная весу вытесненной телом жидкости. Закон Архимеда предопределяет, будет ли тонуть тело в жидкости или оно будет плавать на ее поверхности. Очевидно, это зависит от соотношения плотностей жидкости и материала тела.

Действие закона Архимеда проявляется в явлении смещения стержней – специальных вставок в литейные формы для получения отливок с внутренними полостями. Стержни изготавливаются из смесей, обладающих плотностью не более $1600 \dots 1700 \text{ кг/м}^3$, т.е. значительно меньшей, чем плотность большинства металлических расплавов. Поэтому стержни могут всплывать в расплавах, заполняющих литейные формы. Чтобы предотвратить это, знаки стержней (их опорные части) делаются такими, чтобы надежно удерживать стержни в литейной форме до заливки ее расплавом, когда действует только сила тяжести, и после заливки, когда возникает архимедова сила, способная вызвать всплывание стержня.

2.2. Текущий расплав. Заполнение литейной формы расплавом. Литниковые системы

Закономерности, которые действуют в текущем расплаве, описываются основным законом гидродинамики, выражающимся уравнением Бернулли (2.2):

$$z_1 + p_1 / \rho g + v_1^2 / 2g = z_2 + p_2 / \rho g + v_2^2 / 2g, \quad (2.2)$$

где z – высота расположения сечений 1 и 2 канала, по которому течет расплав, от произвольно выбранного уровня, здесь $z = 0$;
 v и p – линейная скорость потока и давление в сечениях 1 и 2 канала; ρ – плотность расплава; g – земное ускорение (см. рис. 2.2).

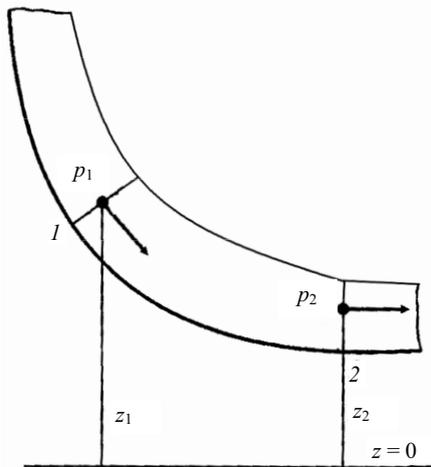


Рис. 2.2. Схема к иллюстрации закона Бернулли

Члены уравнения (2.2) имеют линейную размерность (метр, сантиметр) и выражают напор жидкости в сечениях 1 и 2: z – геодезический напор, $p/\rho g$ – пьезометрический напор, $v^2/2g$ – скоростной напор. Словесно основной закон гидродинамики формулируется так: сумма геодезического, пьезометрического и скоростного напора в текущей жидкости есть величина постоянная. Этот закон представляет собой частный случай всеобщего закон сохранения энергии.

Уравнение (2.2) описывает поведение идеальной жидкости с нулевой вязкостью и нулевым трением о стенки канала. Для описания

поведения любой реальной жидкости – воды или металлического расплава – в правую часть уравнения (2.2) вводится дополнительный член, учитывающий потери напора при течении расплава от сечения 1 до сечения 2. Эти потери рассчитываются по специальным зависимостям. Уравнение Бернулли служит основой для расчета *литниково-вой системы* (см. далее).

Как известно, течение жидкости может быть ламинарным или турбулентным. При ламинарном течении элементарные струйки жидкости движутся, не перемешиваясь, при турбулентном – струйки перемешиваются из-за движения не только вдоль общего потока, но и под произвольными углами к нему, образуя местные завихрения. Характер течения жидкости принято оценивать с помощью критерия Рейнольдса: $Re = 4R_{гидр} \cdot v/\nu$, где $R_{гидр}$ – гидравлический радиус канала, по которому течет жидкость; v – линейная скорость потока; ν – кинематическая вязкость жидкости. Гидравлический радиус равен отношению площади поперечного сечения потока к смоченному периметру сечения канала. Для канала с сечением в виде круга диаметром d гидравлический радиус равен $R_{гидр} = [\pi d^2/4]/\pi d = d/4$. Для воды установлено, что ламинарное течение происходит при $Re \leq 2400$. Для получения доброкачественных отливок желательна наименьшая величина критерия Рейнольдса.

Заполнение литейной формы расплавом, несмотря на свою кратковременность, серьезно сказывается на качестве литых заготовок – фасонных отливок и слитков. Струя расплава при заливке активно взаимодействует с кислородом воздуха. В результате кислород либо растворяется в расплаве, либо расплав покрывается пленкой нерастворимых оксидов. Во всех случаях расплав оказывается загрязненным, и качество литых заготовок ухудшается: уменьшается прочность и пластичность металла, снижается его коррозионная стойкость и многие рабочие свойства. Поэтому при заливке литейных форм длина свободно падающей струи должна быть минимальной, а диаметр – максимальным. При литье слитков из сплавов цветных металлов на поверхности расплава, заполняющего литейную форму (изложницу или кристаллизатор), всегда устанавливают воронки, коробки, чаши, в которые заливают расплав толстой короткой струей из печи или ковша и из которых расплав выходит через донные отверстия в рабочую полость литейной формы ниже уровня жидкого металла в форме без образования свободных струй.

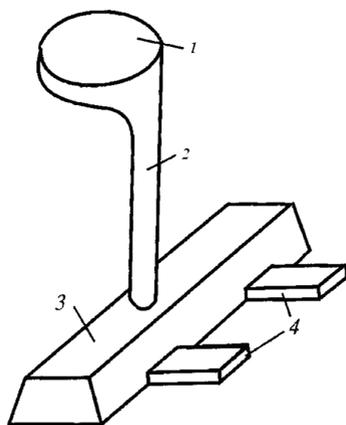


Рис. 2.3. Литниковая система:

1 – литниковая чаша; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель; 4 – литники (питатели)

При получении фасонных отливок заполнение литейных форм производится, как правило, через *литниковую систему* (рис. 2.3).

Ввиду важности операции заполнения литейной формы расплавом для качества отливки разработаны различные способы расчета литниковых систем. При этом определяются площади сечения каналов системы, длина каналов оказывается заданной конструкцией отливки и литейной формы. В общем случае рассчитывается поперечное сечение самого узкого канала, сечения остальных каналов находят по соотношениям, выработанным производственной практикой для данного типа отливок (по размерам, по сплавам, по условиям эксплуатации). В основе расчета лежит уравнение Бернулли (2.2). Однако в это уравнение не входит время – важнейший показатель процесса заполнения литейной формы расплавом. Время заполнения τ определяют с помощью эмпирических формул, в которые входят масса отливки, средняя толщина стенки отливки и различные постоянные коэффициенты.

В настоящее время используют почти исключительно так называемые расширяющиеся литниковые системы. Такие системы называют также незаполненными или открытыми. В расширяющихся системах самым узким местом является нижнее сечение стояка, где он примыкает к шлакоуловителю.

Сужающиеся литниковые системы, в которых поперечные сечения каналов уменьшались по направлению течения металла, широко ис-

пользовались до 1920–1930 гг., когда требования к качеству литых изделий были достаточно мягкими. Главная задача заключалась в том, чтобы жидкий металл заполнил литейную форму. В плавильных печах того времени с трудом удавалось настолько перегреть жидкий металл, чтобы он был достаточно «горячим» и способен заполнять тонкие стенки отливок. В этих условиях наилучшие результаты получались, если заливка производилась быстро и линейная скорость течения металла была большой. Металл подводился к самым тонким участкам отливки.

Примерно с начала XX столетия в связи с развитием новых отраслей машиностроения (автомобильной, авиационной, позже ракетной и атомной промышленности) требования по прочности, ударной вязкости, плотности (отсутствию пористости), коррозионной стойкости литого металла резко возросли. Необходимо было обеспечить получение отливок с минимальным количеством различного рода включений и минимальной пористостью усадочного и газового происхождения. Это было достигнуто комплексом различных мероприятий по плавке и рафинированию металлов, а также введением в производственную практику расширяющихся литниковых систем, которые обеспечивали малую линейную скорость расплава при входе в рабочую полость литейной формы, вследствие чего не происходит захват воздуха и образование оксидных пленистых включений. Литники стали подводить к массивным частям отливки, под прибыль. Это обеспечивало направленное затвердевание отливок и минимальную вероятность появления усадочной пористости и рыхлоты.

Контрольные вопросы

1. Каково давление в металлическом расплаве, имеющем плотность ρ , на глубине h от свободной поверхности? В каком направлении действует это давление?
2. Зачем литейные формы, состоящие из нижней и верхней полуформ, перед заливкой либо скрепляют между собой, либо на верхнюю полуформу кладут груз?
3. Почему стержни, установленные в литейной форме, могут всплыть в расплаве, заполняющем литейную форму при заливке?
4. Из каких элементов (каналов) состоит литниковая система?
5. В чем заключается разница между сужающимися и расширяющимися литниковыми системами?

Глава 3. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

3.1. Общие закономерности процесса кристаллизации вещества

Кристаллизацией называется физико-химический процесс перехода высокотемпературной жидкой (или газообразной) фазы в низкотемпературную твердую кристаллическую фазу. Для начала кристаллизации и ее хода необходимо, чтобы температура жидкости (или пара) оказалась меньше, чем та, при которой наблюдается равновесие между высокотемпературной и низкотемпературной фазами. Разница между этими температурами называется *переохлаждением*.

Кристаллизация абсолютно чистого вещества начинается в результате самопроизвольного возникновения очень мелких кристалликов размером в тысячные доли микрометра. Эти кристаллики называют центрами, или зародышами, кристаллизации. Рост зародышей возможен при меньшем переохлаждении, чем при их появлении. Переохлаждение обеспечивается отводом тепла от кристаллизующегося вещества, создающим определенную скорость охлаждения.

Эти явления происходят, если скорость охлаждения не превышает некоторого предельного значения. При больших скоростях охлаждения и соответственно больших переохлаждениях вязкость жидкого металла возрастает настолько, что атомы не успевают занять положение, определяемое кристаллической структурой вещества. В результате расплав затвердевает не кристаллизуясь, и получается *аморфный* металл. Некоторые сплавы металлов (особенно с неметаллами) переходят в аморфное состояние уже при скоростях охлаждения $(10...20) \cdot 10^3$ К/с). Производство подобных сплавов в виде тонких лент реализовано в промышленных масштабах.

Влияние примесей на кристаллизацию. Описанное самопроизвольное (гомогенное) возникновение центров кристаллизации имеет место только в очень чистых металлах, где переохлаждение может достигать до сотен градусов. Кристаллизация металлов и сплавов технической чистоты начинается при переохлаждениях $5...10$ К и менее. Это объясняется присутствием в технических расплавах различных примесей. В данном случае важны нерастворимые примеси, находящиеся