

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра «Пиromеталлургические и литейные технологии»

621.74(07)
Т338

Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина
И.Н. Ермаков, А.С. Варламов

ТЕОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ

Учебное пособие

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2017

УДК 621.74(075.8) + 621.74.01(075.8)
Т338

Одобрено
учебно-методической комиссией
физико-металлургического факультета

Рецензенты:
К.Н. Вдовин, В.В. Ерофеев

Т338 **Теория формирования отливки:** учебное пособие / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, И.Н. Ермаков, А.С. Варламов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – 195 с.

Пособие содержит общие теоретические сведения, типовые задачи для расчетов параметров литейных процессов формирования отливки, соответствующие варианты заданий и примеры их выполнения, а также лабораторный практикум. Пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения и может использоваться при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» (22.03.02 и 22.04.02).

УДК 621.74(075.8) + 621.74.01(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2017.

ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие содержит 7 разделов, включающих общие теоретические положения, варианты контрольных заданий и примеры расчетов свойств расплавов, гидравлических и тепловых процессов при заполнении форм металлом и его затвердевании, пригарообразования на отливках. В пособии также приведены методики определения газового режима литейных форм, теоретические основы процессов усадки и трещинообразования отливок. Каждый из разделов содержит лабораторный практикум.

Проведение расчетов позволит студентам более глубоко усвоить сущность сложных физико-химических процессов, протекающих при формировании отливок, выявить общие закономерности внешне различных явлений. Представленные в пособии теоретические сведения, методики расчетов, в том числе имеющих и программное обеспечение на ЭВМ, а также справочные материалы, приведенные в соответствующих приложениях, могут быть использованы при определении оптимальных технологических параметров изготовления отливок.

Пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» (22.03.02 и 22.04.02).

Предусматривается в ходе проведения занятий, руководствуясь учебным пособием, задействовать современное оборудование, приобретенное в рамках реализации национального проекта «Образование» и программы развития Южно-Уральского государственного университета, как национального исследовательского университета. Это позволит студентам творчески интегрировать основные положения теории литейных процессов, их компьютерного моделирования с практикой технологических расчетов и изготовления высококачественных литейных форм, стержней и отливок.

1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

1.1. Общие сведения

1.1.1. Состав и структура форм

Литейная форма представляет собой систему элементов, образующих рабочую полость определенной конфигурации, при заливке которой расплавленным металлом формируется такой же конфигурации отливка [1, 2].

Конструкция разовой песчано-глинистой формы для стальной отливки «колесо» представлена на рис. 1.1.

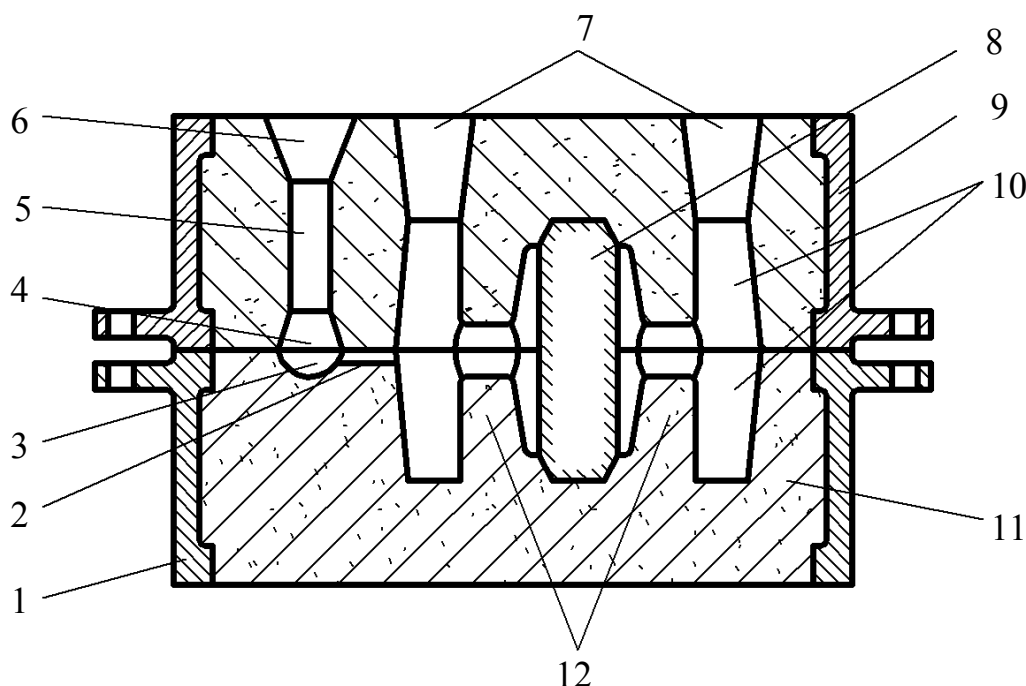


Рис. 1.1. Литейная форма: 1 – опока нижняя; 2 – питатель; 3 – зумпф; 4 – шлакоуловитель; 5 – стояк; 6 – воронка; 7 –прибыли; 8 – стержень; 9 – опока верхняя; 10 – полость, оформляющая отливку; 11 – формовочная смесь; 12 – болваны нижние

По своей природе материалы для изготовления форм можно разделить на сплошные, твердые и дисперсные [3].

Формы из сплошных материалов – многократные, позволяют получить без разрушения большое количество отливок. Типичные представители – металлические сплавы – чугун, сталь, молибденовые сплавы для кокильного, центробежного, литья под давлением. К сплошным материалам можно отнести также блочный графит, который используют при изготовлении форм для отливок из тугоплавких сплавов на основе титана, молибдена, а также радиоактивных металлов – урана, плутония [4, 5].

Для литья мелких художественных изделий из легкоплавких сплавов известно применение резиновых литейных форм.

подавляющее большинство отливок в настоящее время изготавливается в разовых формах, материалом которых являются дисперсные системы. Основу данных дисперсных систем образуют зерна огнеупорных соединений. Такие системы называют формовочными материалами. Различают исходные формовочные материалы и приготавливаемые из них формовочные смеси, подразделяемые на собственно формовочные смеси и стержневые смеси [1].

В составе формовочных смесей выделяют наполнитель – огнеупорную зерновую основу; связующие материалы, обволакивающие поверхность зерен и обеспечивающие превращение дисперсной смеси в монолит, и специальные добавки, обеспечивающие требуемый уровень технологических свойств смеси.

Формовочную и стержневую смеси, использованные в технологическом процессе получения отливок и освобождающиеся после ее охлаждения, называют отработанной смесью. Основной частью смеси, обычно более 80 %, а иногда и более 90 % ее массы, является наполнитель – твердый компонент, придающий смеси необходимую прочность при сжатии. Наиболее часто в качестве наполнителя применяется кварцевый песок, названный так по главному пороодообразующему минералу – кварцу (SiO_2), имеющему плотность $2,65 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, температуру плавления $1713 \text{ }^\circ\text{C}$, твердость по шкале Мооса 5,5...7,0 ед. Наполнителями могут быть и другие материалы, естественные или синтетические, например, оливин $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$, шамот $(n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2)$, муллит $(3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2)$, циркон $(\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2)$, магнетит (MgO) , электрокорунд (Al_2O_3) . Форма и размер зернового состава оказывают важное влияние на технологические свойства формовочной смеси [2].

Второй главной составляющей формовочных смесей является связующее. Оно придает смеси способность принимать форму, соответствующую модели, и уплотняться при формовке. В жидком состоянии связующее покрывает поверхность зерен наполнителя пленкой, которая далее при уплотнении создает вокруг точек контакта между зернами манжеты, и, наконец, переходит в твердое состояние, превратив сыпучую или жидкоподвижную смесь в монолитную среду [5].

Основными классификационными признаками связующих материалов являются их химическая природа, способность растворяться в воде или смачиваться водой, способность сообщить смесям прочность, а также характер затвердевания – обратимый или необратимый.

К классу «А» относят органические связующие, не растворимые и не смачиваемые водой (гидрофобные или неводные), к классу «Б» – органи-

ческие гидрофильные (водные) связующие, к классу «В» – неорганические водные.

Водные связующие проявляют свои свойства после растворения их в воде. Неводные связующие с водой не взаимодействуют и используются в виде растворов в органических растворителях – спиртах, ацетоне, бензине и др.

Наиболее широко применяются в литейном производстве связующие класса «В» – глина, жидкое стекло.

Литейными формовочными глинами называются горные породы, состоящие из тонкодисперсных частиц водных алюмосиликатов, содержащие более 50 % глинистой составляющей (частиц размером зерен менее 22 мкм). К качественным характеристикам формовочных глин относятся состав и строение порообразующего минерала (химико-минералогическая характеристика), дисперсность (физическая характеристика) и ионообменный состав (химическая характеристика). Отличительной особенностью глин является способность набухать в воде, причем, чем больше глина способна удерживать воды, тем выше ее связующие и пластические свойства.

В литейном производстве используются каолиновые и бентонитовые глины. Основным минералом каолиновых глин является каолинит, представляющий водный алюмосиликат $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ с температурой плавления 1750...1787 °С. Кристаллическая решетка каолинита имеет пакетное строение, каждый пакет состоит из двух слоев, связанных сильной ионной связью. Каолинит обладает малой способностью к набуханию, так как адсорбция воды осуществляется только на внешних поверхностях пакетов.

Основным порообразующим минералом бентонитовых глин является монтмориллонит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. По своей кристаллической структуре он относится к высокодисперсным минералам с изменяющейся разбухающей решеткой, способной поглощать воду. Это обеспечивается большим расстоянием и слабыми силами Ван-Дер-Ваальса между ионами. Монтмориллонит в воде способен увеличивать свой объем в 10...12 раз.

Качество глин тем выше, т.е. выше термохимическая устойчивость и меньше склонность отливок к образованию пригара, чем меньше в них содержится примесей – оксидов щелочных, щелочноземельных металлов, оксидов железа и сульфида серы.

Ионообменный состав формовочных глин характеризуется емкостью обменных катионов, их качественным и количественным составом. Чем выше емкость обменных катионов, тем легче материал поддается химической активации под действием введенных в смесь химических добавок. Активация сопровождается повышением прочности формовочных смесей [6, 7].

Жидкое стекло как связующее применяют в жидкостекольных смесях. Оно представляет собой водный раствор силикатов натрия $\text{Na}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2\cdot m\text{H}_2\text{O}$ или калия $\text{K}_2\text{O}\cdot n\text{SiO}_2\cdot m\text{H}_2\text{O}$. Особенностью жидкого стекла является склонность быстро затвердевать при продувке углекислым газом, введении специальных отвердителей (шлака феррохромового производства – $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) или тепловой обработке. Основной характеристикой жидкого стекла является силикатный модуль

$$M = K \cdot [\text{SiO}_2] / [\text{Na}_2\text{O}], \quad (1.1)$$

где $[\text{SiO}_2]$ и $[\text{Na}_2\text{O}]$ – содержание диоксида кремния и оксида натрия в жидком стекле, %; K – коэффициент, показывающий отношение молекулярной массы оксида натрия к молекулярной массе диоксида кремния,

$$K = \frac{Mr(\text{Na}_2\text{O})}{Mr(\text{SiO}_2)} = 1,032. \quad (1.2)$$

Чем больше модуль жидкого стекла, тем быстрее затвердевает формовочная смесь, выше прочность в сыром состоянии и ниже в сухом. Недостатком жидкого стекла как связующего является затрудненная выбиваемость отливок из форм.

В отличие от неорганических, органические связующие выгорают при заливке расплава в литейную форму, что обеспечивает хорошую податливость и выбиваемость.

К органическим неводным связующим (класс «А») относятся: затвердевающие необратимо – растворы растительных масел, а также маслянистых продуктов нефтепереработки в органических растворителях; затвердевающие обратимо – канифоли, битумы, пеки.

К органическим водным (класс «Б») затвердевающим необратимо относятся синтетические смолы: фенолальдегидные, аминокальдегидные (мочевиноформальдегидные, фурановые).

Затвердевание смол может осуществляться за счет действия тепла, за счет одновременного действия тепла и катализатора, за счет катализатора (холодное затвердевание).

К связующим класса «Б», затвердевающим обратимо, относятся коллоидные растворы органических веществ и эмульсий в водной среде (лигносульфонаты, декстрин, патока).

Приготовление формовочной смеси заключается в подготовке и перемешивании всех ее компонентов. При этом смесь может готовиться как полностью из свежих компонентов, так и частично из бывшей в употреблении смеси, которая предварительно подвергается регенерации. Регенерация (восстановление) отработанной смеси заключается в отделении пленок связующего от зерновой основы. Существует механический, гидравлический и термический способы регенерации.

Для приготовления формовочных и стержневых смесей применяют литейные смесители каткового, лопастного и шнекового типов.

Песчано-глинистые формы изготавливают, уплотняя смесь вокруг модели. В зависимости от размера форм и стержней, состава смесей, требований к качеству отливок и ряда других факторов, используют различные способы уплотнения формовочных смесей: прессование, встряхивание, воздушно-импульсное уплотнение, пескодувное, пескострельное, уплотнение пескометом и др. Существуют также жидкоподвижные самотвердеющие смеси, которые не требуют специального уплотнения.

Сырые формы могут быть залиты жидким металлом сразу после изготовления, сухие формы и стержни получают при тепловой обработке (сушке), в результате которой они повышают прочность, и только после этого подают на заливку. Химически отверждаемые формы и стержни приобретают комплекс требуемых служебных свойств после протекания в них химических реакций отверждения.

В литейном производстве преимущественно применяются сырые песчано-глинистые смеси, структура которых показана на рис. 1.2.

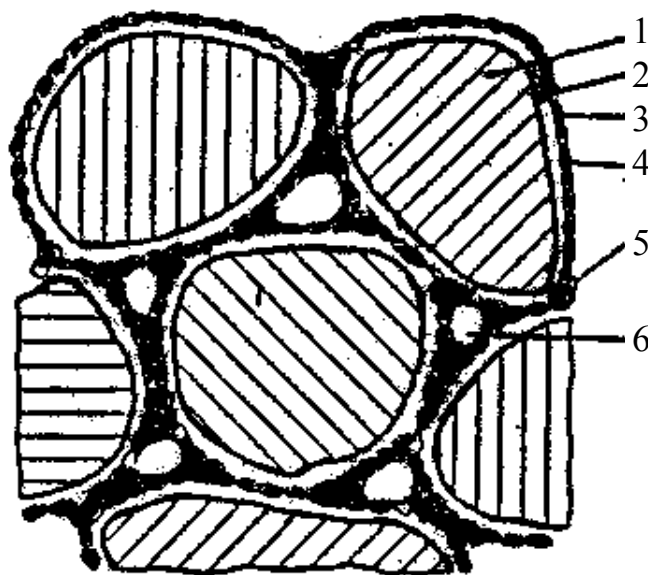


Рис. 1.2. Схема структуры формовочной смеси: 1 – зерна кварцевого песка; 2 – вода, связанная кварцем; 3 – частицы глины; 4 – вода, связанная глиной; 5 – свободная вода; 6 – воздух

Отдельные кварцевые зерна (со связанной водой) покрыты оболочками из глинистых частиц, которые также связывают определенное количество воды. В зазорах между зернами капиллярными силами удерживается свободная вода, а в свободном пространстве находится воздух. Свободное пространство между зернами зависит от величины отдельных зерен и тесноты их контакта при данной степени уплотнения смеси.

Для теоретического изучения свободных пространств между зернами песка рассматривают так называемую идеальную песчаную форму. Это форма, состоящая из идеальных шарообразных зерен радиусом R одинако-

вой величины с нулевой пластичностью. Изменения взаимного расположения зерен можно достичь за счет различной степени уплотнения.

При наименьшей степени уплотнения между четырьмя контактирующими шарообразными зернами имеется пространство, в которое можно вписать шар радиуса $r_1 = 0,41R$. В этом случае свободное пространство между зернами занимает 47,6 % общего объема.

Расположение зерен формовочного песка при наименьшей степени уплотнения представлено на рис. 1.3.

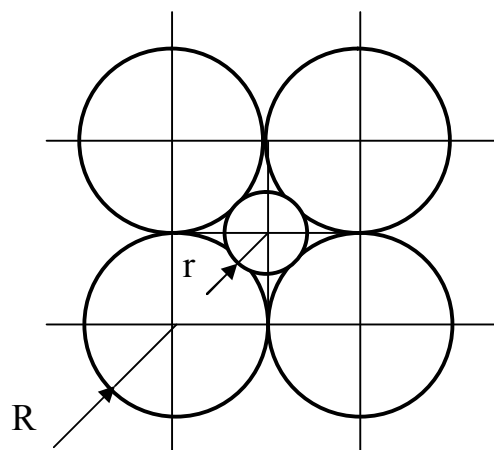


Рис. 1.3. Расположение зерен формовочного песка при наименьшей степени уплотнения

При наибольшей степени уплотнения взаимное положение зерен характеризуется наиболее плотной упаковкой, когда во всех плоскостях, проходящих через центры взаимно касающихся шарообразных зерен, имеются поры, в которые можно вписать шары радиусом $r_2 = 0,154R$. Свободное пространство между зернами при таком их расположении составляет 25,9 % от общего объема формы.

Расположение зерен формовочного песка при наибольшей степени уплотнения показано на рис. 1.4.

По своей физической структуре смеси и литейные формы являются капиллярно-пористыми телами. Их основными характеристиками выступают пористость, эффективный диаметр (радиус) пор и проницаемость.

Пористость литейной формы Π есть отношение объема пустот V_{Π} к полному объему пористого тела V , т.е.

$$\Pi = \frac{V_{\Pi}}{V}. \quad (1.3)$$

Все встречающиеся в формах поры целесообразно разделить на три вида: открытые, тупиковые и закрытые.

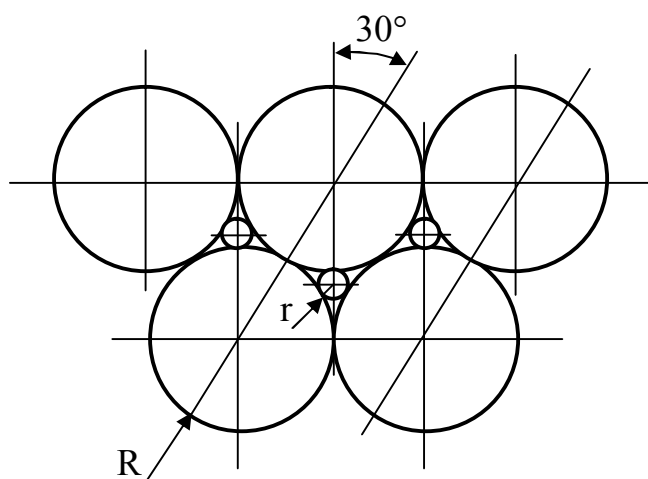


Рис. 1.4. Расположение зерен формовочного песка при наибольшей степени уплотнения

Открытая пористость Π_0 сообщается с поверхностью тела и участвует в фильтрации жидкости или газа при наличии градиента давления на пористом теле.

Закрытые поры Π_3 не сообщаются с поверхностью и поэтому не участвуют в фильтрации жидкости или газа.

Тупиковые поры Π_T соединяются только с одной поверхностью формы и также не участвуют в процессах фильтрации, хотя и заполняются жидкостью и газом.

Таким образом, общая пористость тела складывается из трех видов пористости:

$$\Pi = \Pi_0 + \Pi_3 + \Pi_T. \quad (1.4)$$

Для оценки проницаемости литейных форм наибольший интерес представляет величина открытой пористости, определяющая их фильтрационные способности.

Определение открытой и тупиковой пористости ($\Pi_0 + \Pi_T$) производят по методике, основанной на взвешивании сухого и насыщенного смачивающей жидкостью (водой, спиртом и др.) пористого образца. Тогда

$$\Pi_0 + \Pi_T = \frac{G_H - G_C}{V\rho_{ж}}, \quad (1.5)$$

где G_H и G_C – соответственно вес насыщенного и сухого образца, кг; V – объем образца, m^3 ; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, kg/m^3 .

Объем простого пористого образца V находят расчетом по результатам обмера геометрических размеров тела.

Объем пористых тел сложной конфигурации обычно определяют путем их погружения в несмачиваемую жидкость, например, ртуть.

Общую пористость формы можно определить формуле

$$\Pi = 1 - \frac{\rho}{\rho_M}, \quad (1.6)$$

где ρ_M – действительная физическая плотность компактного материала, кг/м^3 ; ρ – плотность литейной формы, кг/м^3 .

Физическая плотность компактного материала электрокорунда равна $3,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, а кварца – $2,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Плотность образцов определяется как соотношение

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.7)$$

Массу образца m можно найти путем взвешивания, а его объем V – по результатам обмера геометрических размеров или погружением в несмачиваемую жидкость.

После расчетов общей пористости образцов Π и плотности литейной формы ρ свободный объем пор V_C , приходящийся на 1 кг формы, определяется по формуле

$$V_C = \frac{\Pi}{\rho}. \quad (1.8)$$

Общая поверхность пор S , приходящаяся на 1 кг массы формы, рассчитывается по формуле

$$S = \frac{4V_C}{D_{\text{эф}}}, \quad (1.9)$$

где $D_{\text{эф}}$ – эффективный диаметр пор, м.

Определение диаметра пор форм основано на том, что в порах, заполненных жидкостью, действуют капиллярные силы. Для преодоления этих сил необходимо создать определенное давление газа. Величина прилагаемого давления зависит от величины поверхностного натяжения, плотности жидкости, краевого угла смачивания, радиуса капилляров, т.е.

$$2\pi R\sigma \cos\theta = \pi R^2 h \rho_{\text{ж}} g, \quad (1.10)$$

где R – радиус капилляра, м; σ – сила поверхностного натяжения жидкости, Н/м; θ – краевой угол смачивания, град.; h – равновесная высота капиллярного подъема жидкости, м; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Отсюда

$$R = \frac{2\sigma \cos\theta}{\rho_{\text{ж}} g h}, \quad (1.11)$$

или для эффективного (усредненного) диаметра пор

$$D_{\text{эф}} = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho_{\text{ж}} g h}. \quad (1.12)$$

Проницаемость – свойство пористого материала пропускать через себя жидкость или газ под действием приложенного градиента давления. Проницаемость характеризуется структурой пористого материала и режимом течения газа или жидкости в порах.

Зная площадь фильтрации формы и ее толщину, проницаемость рассчитывают по уравнению Л.С. Лейбензона, полученному из общего закона фильтрации Дарси:

$$C = \frac{\mu Q l}{F \Delta P \tau}, \quad (1.13)$$

где C – проницаемость формы, м^2 ; μ – динамическая вязкость газа, $\text{Па}\cdot\text{с}$; Q – объем газа, прошедшего через стенку формы, м^3 ; l – толщина стенки формы, м ; F – площадь фильтрации, м^2 ; ΔP – градиент давления газа, Па ; τ – продолжительность пропускания объема газа Q через форму, с .

Для экспериментального измерения проницаемости форм при нормальных условиях используют стандартный прибор по определению газопроницаемости формовочных и стержневых смесей.

Динамическая вязкость газов является функцией температуры:

$$\mu_T = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^m, \quad (1.14)$$

где T – температура испытания, К ; m – показатель степени, равный для воздуха 0,68; μ_T – динамическая вязкость газа при температуре испытания T , $\text{Па}\cdot\text{с}$; μ_0 – динамическая вязкость газа при температуре T_0 , $\text{Па}\cdot\text{с}$.

1.1.2. Свойства формовочных смесей

Формовочная смесь проходит в литейном цехе сложный цикл технологических операций. В этом цикле можно выделить два основных периода:

- технологический период, включающий подготовку формовочной и стержневой смеси, изготовление и сборку форм и стержней;
- служебный период, охватывающий сложные и многогранные процессы физико-химического взаимодействия формовочной смеси с жидким металлом и формирующейся отливкой.

В технологическом периоде формовочная смесь выступает как материал, в результате обработки которого образуется литейная форма. В служебном периоде формовочная смесь – инструмент, с помощью которого залитый в форму металл превращается в отливку. В этот период происходит формирование всех свойств отливки, на которые существенно влияет формовочная смесь. В этот же период формовочная смесь превращается в

отработанный материал, подвергающийся глубоким физико-химическим изменениям под действием тепла залитого в форму металла.

В каждом из отмеченных периодов к свойствам формовочных смесей предъявляются требования. В соответствии с названными периодами свойства формовочных смесей делятся на технологические и служебные. Кроме того, в отдельную группу выделяются общие свойства смесей.

К основным технологическим свойствам формовочных смесей относятся: прочность, осыпаемость, прилипаемость, уплотняемость, текучесть, живучесть, гигроскопичность.

Прочность. Формовочные смеси должны обладать достаточной прочностью для того, чтобы изготовленная форма не разрушалась при сборке и транспортировке к участку заливки. Различают прочность формовочных и стержневых смесей в сыром и сухом состояниях. Прочность смеси в сыром состоянии зависит от количества и качества связующих материалов, введенных в смесь, от величины зерен формовочного песка, а также от степени уплотнения смеси в форме. Прочность форм и стержней в сухом состоянии зависит от температуры и продолжительности их сушки, гигроскопичности материалов, из которых они изготовлены, от количества и качества связующих материалов.

Предел прочности в сыром состоянии обычно определяют на сжатие, в сухом – на растяжение.

Различают манипуляторную и рабочую прочность. Манипуляторная прочность обеспечивает извлечение стержней из стержневого ящика или съём формы с модели. Рабочая прочность – это прочность форм и стержней перед заливкой металла.

У литейщиков есть понятие удельной прочности. Это прочность, отнесенная к 1 % связующего материала. Данные по удельной прочности смесей дают возможность сравнивать связующую способность различных связующих материалов и выбирать составы смесей с оптимальными свойствами с учетом их стоимости.

Осыпаемость. Она характеризует поверхностную прочность форм и стержней. Чем больше поверхностная прочность, тем меньше осыпаемость. Осыпавшиеся формы и стержни приобретают неровную шероховатую поверхность и теряют заданные геометрические размеры. Все это снижает качество отливок. Осыпаемость определяется по потере массы образца при трении его о стенки вращающегося барабана.

Прилипаемость. Это приставание частиц смеси к поверхности стержневого ящика или модели во время изготовления стержней и форм. Прилипаемость смесей зависит от рода применяемого связующего и устраняется путем нанесения на поверхность моделей и стержневых ящиков антиадгезионных покрытий.

Пластичность. Существенную роль в процессе формообразования играют пластические свойства. Под пластичностью понимается свойство смеси деформироваться под действием внешних усилий, заполнять углубления и выемки модели и сохранять полученную конфигурацию. Пластичность – комплексное понятие, оно выражается через такие свойства, как уплотняемость и текучесть.

Уплотняемость. Это способность формовочных смесей изменять первоначальный объем под влиянием внешних воздействий за счет уменьшения пористости. Она сопровождается возникновением местных сдвигов минеральных частиц и проникновением более мелких в поры между крупными частицами, а также изменением толщины водноглинистых оболочек. Уплотняемость формовочных смесей определяется по изменению высоты формовочной смеси в цилиндрической гильзе до и после уплотнения.

Текучесть. В отличие от уплотняемости, текучесть формовочной смеси характеризует способность минеральных частиц перемещаться вне пределов первоначального объема (во всех направлениях) под влиянием сжимающих и касательных напряжений, возникающих от действия уплотняющих сил. Существует несколько методик определения текучести формовочных смесей:

- по отношению величин твердости уплотненной смеси в определенных точках;
- по разнице диаметров образца до и после встряхивания;
- по отношению разницы изменения высоты образца смеси в гильзе с вырезами в нижней части по контуру и изменение высоты образца в гильзе без вырезов к высоте свободной насыпки.

Живучесть. Это способность смеси сохранять технологические свойства с течением времени. Важное значение живучесть имеет для самотвердеющих смесей.

Гигроскопичность. Это способность форм и стержней впитывать влагу из окружающей среды. Гигроскопичность смесей оказывает большое влияние на технологические свойства форм и стержней, особенно в высушенном состоянии.

По мере впитывания влаги из воздуха формы и стержни постепенно снижают общую и поверхностную прочность и значительно повышают газотворность.

К основным служебным свойствам формовочных смесей относятся прочность при высоких температурах, мокрая прочность, газопроницаемость, газотворность, теплопроводность, теплоаккумулирующая способность, податливость, термостойкость, антипригарность, выбиваемость и регенерируемость.

Прочность при высоких температурах. При заливке металла стенки формы и стержня интенсивно прогреваются. Участки формы по глубине

прогреваются неравномерно, что приводит к возникновению напряжений, различных по величине и направлению действия. Возникающие напряжения могут вызвать разрушение форм и стержней.

Кроме тепловых нагрузок литейная форма и стержни должны выдерживать динамический удар металла во время его заливки и подъема.

Поэтому, чтобы противостоять указанным выше нагрузкам, смеси должны обладать определенной прочностью при высоких температурах.

Мокрая прочность. Под действием тепла жидкого металла поверхностная «корка» литейной формы высушивается, а подкорковый слой переувлажняется, что приводит к понижению его предела прочности. Причиной переувлажнения подкоркового слоя является конденсация испарившейся с поверхности формы влаги. Предел прочности подкоркового слоя, называемый «мокрой прочностью», очень низок. Поэтому при заливке металла верхние слои формы под действием тепла излучения вспучиваются и отслаиваются, что в ряде случаев приводит к образованию в отливках таких дефектов, как ужимины.

Газопроницаемость. Проницаемость – свойство пористого тела пропускать через себя жидкость или газ под действием приложенного градиента давления.

Линейную скорость фильтрации газа через пористый образец можно выразить в виде

$$v = \frac{V}{F \cdot \tau}, \quad (1.15)$$

где v – линейная скорость фильтрации, м/с; V – объем фильтрующегося газа, м³; F – площадь поперечного сечения образца, м²; τ – время прохождения данного объема газа, с.

При ламинарном режиме течения газа существует зависимость между скоростью фильтрации и градиентом давления, которая выражается уравнением Дарси:

$$v = k \frac{\Delta P}{\eta \cdot h}, \quad (1.16)$$

где k – коэффициент проницаемости, м²; ΔP – градиент давления, Па; η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; h – высота (толщина) образца, м.

Приравнивая выражения (1.15) и (1.16), имеем

$$\frac{V}{\tau \cdot F} = k \frac{\Delta P}{\eta \cdot h}. \quad (1.17)$$

Тогда

$$k = \frac{V \cdot h \cdot \eta}{\tau \cdot F \cdot \Delta P}. \quad (1.18)$$

Абсолютный коэффициент проницаемости k обычно указывается применительно к определенному газу. В этом случае из формулы (1.18) исключается вязкость, и такой параметр получает наименование коэффициента проницаемости, соответствующего тому газу, который пропускается через образец. Например, коэффициент воздухопроницаемости

$$k = \frac{V \cdot h}{\tau \cdot F \cdot \Delta P}. \quad (1.19)$$

Газопроницаемостью называется способность формовочной смеси пропускать газы сквозь имеющиеся поры. Газопроницаемость зависит от размеров зерен песка, их формы и однородности, от содержания глинистой составляющей, связующих материалов и добавок, а также от степени уплотнения смеси.

Газопроницаемость является важным свойством формовочных смесей, так как при низкой газопроницаемости форм и стержней отливки получают с газовыми раковинами.

Чрезмерно высокая газопроницаемость смесей также недопустима – возникает опасность проникновения жидкого металла в поры формы и образования на отливках пригарного слоя.

Газотворность. Газотворностью называется способность формовочных материалов и смесей выделять то или иное количество газов при нагревании их до высоких температур. Газотворность вызывает один из самых опасных видов литейного брака по газовым раковинам, нередко обнаруживаемым после сложных и дорогих операций механической обработки. Поэтому для изготовления форм и стержней необходимо выбирать материалы с низкой газотворностью. Газотворность ниже $10 \text{ см}^3/\text{г}$ считается нормальной, от 10 до $15 \text{ см}^3/\text{г}$ – допустимой, а выше $15 \text{ см}^3/\text{г}$ – опасной.

Основными теплофизическими свойствами форм, определяющими интенсивность охлаждения отливки, являются теплопроводность и теплоаккумулирующая способность.

Теплопроводность литейной формы определяется количеством тепловой энергии, которая пройдет за единицу времени через поверхность, перпендикулярную к направлению теплового потока, отнесенную к градиенту температур, и выражается коэффициентом теплопроводности λ . Теплопроводность формовочных смесей снижается с повышением их пористости и увеличивается с повышением их влажности, что связано с переносом тепла при миграции водяного пара.

Теплоаккумулирующая способность литейной формы определяется по формуле

$$v_{\phi} = \sqrt{\lambda \cdot C \cdot \rho}, \quad (1.20)$$

где v_f – коэффициент теплоаккумулирующей способности формы, Дж/м²с^{1/2}К; λ – теплопроводность формы, Вт/м·К; C – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; ρ – плотность, кг/м³.

Изменением величины теплоаккумулирующей способности формовочных материалов можно изменять скорость кристаллизации металла и тем самым воздействовать на процесс формирования свойств отливок.

Податливость формы – это способность формовочной смеси не оказывать сопротивления усадке отливки при ее охлаждении в форме. Формы с недостаточной податливостью приводят к возникновению в отливке напряжений и трещин.

Термостойкость формы – это ее способность сопротивляться термическому удару и не разрушаться под воздействием возникающих термических напряжений при заливке металла.

Антипригарность – это способность формы противостоять образованию пригара на отливках. Пригар на поверхности отливок является одним из самых распространенных дефектов, значительно увеличивающих трудоемкость очистных операций. Пригаром обычно называют неметаллическую корку, удерживаемую на поверхности отливок и состоящую из зерен формовочного материала и «цементирующего» вещества. В зависимости от природы этой корки различают два вида пригара: механический и химический. В первом случае «цементирующим» веществом является металл, проникший в поры формы, а во втором – продукты взаимодействия оксидов металла с оксидами формовочных материалов.

Для борьбы с механическим пригаром применяются мелкозернистые пески, а с химическим – используют химически инертные и тугоплавкие формовочные материалы, например, циркон и оливин. Сухие стержни и формы с целью предупреждения образования пригара на отливках покрываются противопригарными красками.

Чаще всего на отливках образуется комплексный химико-механический пригар с преобладанием одного из двух видов.

Выбиваемость – это способность стержней и выступающих частей формы (болванов) удаляться из отливок. Выбивка стержней и остатков формы из отливки является весьма трудоемкой операцией. Выбиваемость во многом зависит от состава смеси и степени ее прогрева.

Общие свойства характеризуют формовочную смесь как химически активную дисперсную пористую систему. К ним относятся влажность, долговечность, однородность, водородный показатель, экологичность.

Влажность. Сухая смесь формовочного песка и глины не обладает связующими свойствами. Для придания прочности такую смесь необходимо увлажнить, т.е. ввести в нее определенное количество воды и тщательно перемешать. Под влажностью понимается содержание воды в формовочной смеси, выраженное в массовых процентах. Влажность придает смесям

необходимые технологические свойства: прочность, пластичность, формруемость и т.д. Вместе с тем, избыточная влажность сообщает смесям ряд отрицательных свойств. К ним относятся повышенная прилипаемость смеси к оснастке, усиление пригара на поверхности отливок и опасность образования газовых раковин в отливках. По указанным причинам влажность песчано-глинистых формовочных смесей должна находиться в пределах от 3,5 до 5,0 %. Снижение влажности ниже указанных пределов без ухудшения технологических свойств может быть достигнуто путем введения в смесь малых добавок поверхностно-активных веществ.

Долговечность. Долговечностью называется способность формовочных смесей сохранять заданные свойства после повторных заливок. В процессе неоднократного использования смеси изменяется ее зерновая основа вследствие растрескивания зерен при нагреве и охлаждении, а также вследствие изменения свойств формовочных глин при нагревании. С целью увеличения долговечности использования смесей в их состав вводят свежие формовочные материалы, например, песок, глину и т.д. Долговечность формовочных смесей в большинстве случаев оценивают по пределу прочности стандартных образцов.

Однородность. Под однородностью понимается равномерное распределение в формовочных смесях составляющих ее частей, получающееся при перемешивании в смесителе. Однородность формовочных смесей определенным образом связана с продолжительностью перемешивания и с конструкцией смешивающих устройств. Во многом она зависит и от состава формовочной смеси. Чем меньше вязкость связующего, вводимого в смесь, тем легче и быстрее осуществляется процесс перемешивания и тем однороднее получится смесь. Поэтому введение разбавителей (растворителей) в формовочные смеси облегчает их перемешивание.

Водородный показатель. В состав формовочных смесей во многих случаях входит вода и различные добавки, например, соли различных кислот и оснований. Реагируя с водой, они образуют кислоты и основания, приводящие к изменению среды раствора, которая может оказывать значительное влияние на свойства смеси и качество отливок. Для определения среды раствора используют водородный показатель рН.

Для нейтральной среды рН равен 7, для кислой – рН меньше 7, для щелочной – рН больше 7. Определение рН растворов осуществляется приборами рН-метрами или индикаторами.

Экологичность. Под экологичностью понимается степень безвредности формовочных смесей для работающих в литейном производстве и окружающей среды. К вредным выделениям относятся одноатомный фенол C_6H_5OH , формальдегид CH_2O , выделяемые синтетическими смолами, а также соединения шестивалентного хрома, которые применяются в качестве отвердителя жидких самоотвердеющих смесей и другие вещества.

Особенно вредна кварцевая пыль с размером песчинок менее 5 мкм, вызывающая заболевание силикозом.

Для улучшения тех или иных свойств в формовочные смеси в небольших количествах могут вводиться специальные добавки. Их очень много и подразделяются они по признаку сходного назначения. Есть добавки, улучшающие свойства смеси на стадии формовки – реологические свойства (поверхностно-активные вещества), повышающие прочность, живучесть смеси. Добавки, улучшающие свойства смесей и повышающие качество отливок на стадии заливки и выбивки – это противопопригарные материалы, добавки, улучшающие податливость форм, изменяющие теплопроводность и т.д. Нередко вводимая добавка может улучшать в формовочной смеси не одно, а несколько свойств.

Перечисленные выше свойства необходимо учитывать при разработке составов формовочных и стержневых смесей для форм, используемых при изготовлении отливок из различных сплавов.

1.2. Варианты контрольных заданий

Задание 1.2.1. Расчет пористости литейной формы

В соответствии с вариантами задания (табл. 1.1) рассчитать сумму открытой и тупиковой, закрытую, полную пористости формы, а также определить эффективный диаметр пор и общую поверхность пор, приходящуюся на 1 кг формы.

При расчётах принять плотность бензилового спирта, насыщающего форму, равной $1,0454 \cdot 10^3$ кг/м³; действительные физические плотности компактных материалов формы: корунда – $3,9 \cdot 10^3$ кг/м³; кварца – $2,6 \cdot 10^3$ кг/м³; краевой угол смачивания спиртом поверхности образца – $\theta = 0^\circ$; поверхностное натяжение спирта $\sigma = 23 \cdot 10^{-3}$ Н/м.

Пример выполнения задания 1.2.1 (вариант «Пример»).

Находим объем формы:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} h = \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} \cdot 0,05 = 9,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3.$$

По формуле (1.7) определяем плотность формы:

$$\rho = \frac{0,16}{9,8 \cdot 10^{-5}} = 1,633 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Общую пористость находим по выражению (1.6):

$$П = 1 - \frac{1,633 \cdot 10^3}{2,6 \cdot 10^3} = 0,37.$$

Варианты задания 1.2.1

№ варианта	Материал формы	Размеры формы, м				Масса формы, кг	Масса насыщенной спиртом формы, кг
		Длина	Ширина	Высота	Диаметр		
Пример	Кварц	–	–	0,05	0,05	0,16	0,19
1.1	Кварц	–	–	0,075	0,10	0,48	0,55
1.2	Кварц	–	–	0,10	0,10	0,64	0,78
1.3	Кварц	–	–	0,30	0,20	3,84	4,61
1.4	Кварц	–	–	0,40	0,30	7,68	9,26
1.5	Кварц	–	–	0,15	0,10	0,96	1,20
1.6	Корунд	–	–	0,05	0,05	0,20	0,21
1.7	Корунд	–	–	0,20	0,10	1,92	2,30
1.8	Корунд	–	–	0,30	0,20	5,76	6,90
1.9	Корунд	–	–	0,40	0,15	5,76	6,90
1.10	Корунд	–	–	0,50	0,10	4,80	5,80
1.11	Кварц	0,05	0,05	0,05	–	0,13	0,16
1.12	Кварц	0,10	0,10	0,10	–	1,04	1,30
1.13	Кварц	0,20	0,10	0,10	–	2,08	2,50
1.14	Кварц	0,20	0,20	0,10	–	4,16	4,92
1.15	Кварц	0,30	0,20	0,10	–	6,24	7,50
1.16	Корунд	0,40	0,05	0,10	–	0,48	0,60
1.17	Корунд	0,05	0,05	0,05	–	0,30	0,36
1.18	Корунд	0,30	0,30	0,10	–	21,6	26,0
1.19	Корунд	0,15	0,15	0,2	–	10,8	12,0
1.20	Корунд	0,15	0,3	0,2	–	21,0	25,0

Сумма открытой и тупиковой пористостей согласно формуле (1.5)

$$P_O + P_T = \frac{0,19 - 0,16}{9,8 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0454 \cdot 10^3} = 0,29.$$

Тогда из уравнения (1.4) закрытая пористость равна

$$P_3 = P - (P_O + P_T) = 0,37 - 0,29 = 0,08.$$

По формуле (1.12) находим эффективный диаметр пор формы:

$$D_{\text{эф}} = \frac{4 \cdot 23 \cdot 10^{-3}}{1,0454 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 0,05} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Определяем свободный объем пор форм, приходящийся на 1 кг формы, по формуле (1.8):

$$V_C = \frac{0,37}{1,633 \cdot 10^3} = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Общая поверхность пор согласно уравнению (1.9) равна

$$S = \frac{4 \cdot 2,27 \cdot 10^{-4}}{1,8 \cdot 10^{-4}} = 5,04 \text{ м}^2/\text{кг}.$$

Таким образом, для данной формы $\Pi = 0,37$; $\Pi_0 + \Pi_T = 0,29$; $\Pi_3 = 0,08$; $D_{\text{ЭФ}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $V_C = 2,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{кг}$; $S = 5,04 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Задание 1.2.2. Расчет проницаемости литейной формы

В соответствии с вариантами задания (табл. 1.2) рассчитать зависимость проницаемости форм от эффективного диаметра пор с учётом результатов опытов, представленных в табл. 1.3, результаты расчётов представить в виде графика $C = f(D_{\text{ЭФ}})$.

При расчетах динамическую вязкость воздуха, фильтрующегося через форму, принять равной $\mu = 18,37 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Таблица 1.2

Варианты задания 1.2.2

№ варианта	Размеры полости формы, м				Толщина стенки формы, м	Объем воздуха, прошедшего через форму, л
	Длина	Ширина	Высота	Диаметр		
Пример	–	–	0,05	0,05	0,05	2
1.21	–	–	0,10	0,10	0,10	4
1.22	–	–	0,20	0,10	0,15	6
1.23	–	–	0,30	0,20	0,20	5
1.24	–	–	0,15	0,40	0,30	10
1.25	–	–	0,25	0,50	0,07	8
1.26	–	–	0,07	0,13	0,03	3
1.27	0,20	0,10	0,05	–	0,05	4
1.28	0,30	0,20	0,08	–	0,07	6
1.29	0,40	0,25	0,15	–	0,09	8
1.30	0,45	0,15	0,20	–	0,10	10
1.31	0,50	0,10	0,20	–	0,12	12
1.32	–	–	0,35	0,60	0,13	15
1.33	–	–	0,55	0,70	0,14	20
1.34	–	–	0,40	0,40	0,17	13
1.35	–	–	0,15	0,80	0,11	20
1.36	–	–	0,30	0,90	0,18	30
1.37	0,05	0,05	0,05	–	0,06	2
1.38	0,08	0,09	0,10	–	0,08	4
1.39	0,15	0,30	0,40	–	0,25	6
1.40	0,28	0,48	0,18	–	0,05	9

Результаты опытов

Фиксируемые параметры	Эффективный диаметр пор формы, $D_{\text{ЭФ}} \cdot 10^6$, м				
	400	315	200	160	100
Градиент давления, $\Delta P \cdot 10^{-5}$, Па	0,1	0,15	0,23	0,32	0,4
Продолжительность фильтрации τ , с	30	40	45	50	60

Пример выполнения задания 1.2.2 (вариант «Пример»).

Определяем площадь фильтрации:

$$F = 2 \frac{\pi d^2}{4} + \pi dh = 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,05^2}{4} + 3,14 \cdot 0,05 \cdot 0,05 = 11,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Для различных размеров эффективного диаметра пор $D_{\text{ЭФ}}$ рассчитываем проницаемость формы по выражению (1.13):

$$D_{\text{ЭФ}1} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м: } C_1 = \frac{18,37 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05}{11,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 10^5 \cdot 30} = 5,2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2;$$

$$D_{\text{ЭФ}2} = 3,15 \cdot 10^{-4} \text{ м: } C_2 = \frac{18,37 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05}{11,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 \cdot 10^5 \cdot 40} = 2,6 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2;$$

$$D_{\text{ЭФ}3} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м: } C_3 = \frac{18,37 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05}{11,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,23 \cdot 10^5 \cdot 45} = 1,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2;$$

$$D_{\text{ЭФ}4} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м: } C_4 = \frac{18,37 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05}{11,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,32 \cdot 10^5 \cdot 50} = 1 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2;$$

$$D_{\text{ЭФ}5} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м: } C_5 = \frac{18,37 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,05}{11,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 10^5 \cdot 60} = 0,7 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2.$$

Таким образом, результаты расчетов следующие:

$D_{\text{ЭФ}} \cdot 10^6$, м	400	315	200	160	100
$C \cdot 10^{13}$, м ²	5,2	2,6	1,5	1	0,7

График зависимости $C = f(D_{\text{ЭФ}})$ представлен на рис. 1.5.

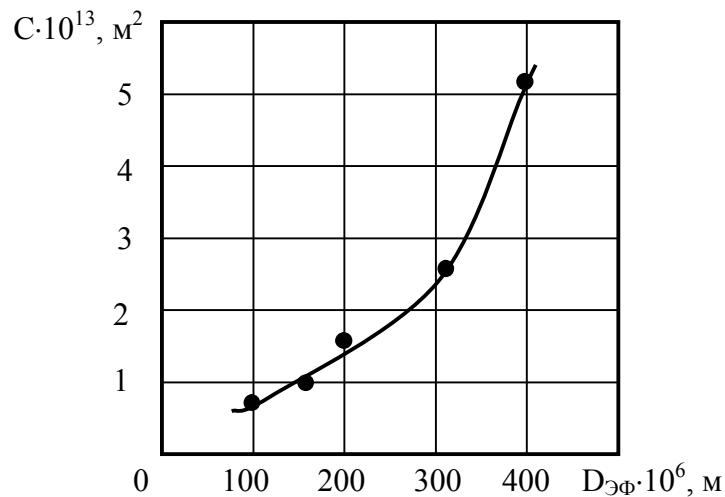


Рис. 1.5. График зависимости $C = f(D_{эф})$

Вывод: при увеличении эффективного диаметра пор увеличивается проницаемость литейной формы.

1.3. Лабораторные работы

Работа 1.3.1. Определение влажности, газопроницаемости и прочности формовочных смесей

Цель работы. Изучить методику определения свойств смесей и применяемое оборудование.

Оборудование, инструмент, материалы: лабораторные бегуны, лабораторный копер, технические весы с разновесами, сушильный шкаф с термометром для измерения температур до 300⁰С, приборы для определения влажности, газопроницаемости, предела прочности при сжатии и растяжении смеси, секундомер, металлическая гильза с поддоном, выталкиватель, специальная гильза для определения газопроницаемости сухого образца, стержневой ящик, мензурка, фарфоровая чашка, эксикатор, щипцы, коробка для смесей, сухой песок, формовочная глина, связующие материалы.

Порядок выполнения работы.

1. Определение влажности, газопроницаемости и прочности формовочных смесей.

1.1. Приготовить две смеси (составы и режимы приготовления задает преподаватель).

1.2. Определить влажность смеси.

1.3. Определить газопроницаемость смеси.

- 1.4. Определить предел прочности смеси во влажном состоянии.
- 1.5. Определить предел прочности смеси при растяжении.
2. Результаты испытаний, их обработка.
 - 2.1. Результаты испытаний свести в табл. 1.4.
 - 2.2. Повторить испытания не менее трех раз.
 - 2.3. Определить среднеарифметические значения свойств смесей, соответствующие дисперсии и доверительные интервалы.

Таблица 1.4

Свойства смесей

№ смеси	Влажность, %		Газопроницаемость, ед		Предел прочности при сжатии во влажном состоянии, Па	Предел прочности при растяжении в сухом состоянии, Па
	По нормальному методу	По ускоренному методу	По нормальному методу	По ускоренному методу		

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Составы смесей и режимы их приготовления.
3. Режимы сушки смесей.
4. Описание методов определения свойств смесей.
5. Таблицы опытных данных и результатов их обработки.
6. Выводы.

Работа 1.3.2. Влияние воды и глины на свойства формовочных смесей

Цель работы. Изучить влияние содержания влаги и глины на газопроницаемость и прочность при сжатии сырых образцов.

Оборудование, инструмент, материалы: лабораторные бегуны, лабораторный копер, технические весы с разновесами, сушильный шкаф с термометром для измерения температур до 300⁰С, приборы для определения влажности, газопроницаемости, предела прочности при сжатии и растяжении смеси, секундомер, Металлическая гильза с поддоном, выталкиватель, специальная гильза для определения газопроницаемости сухого образца, стержневой ящик, мензурка, фарфоровая чашка, эксикатор, щипцы, коробка для смесей, сухой песок, формовочная глина, связующие материалы.

Порядок выполнения работы.

1. Определение влияния глины на свойства смеси.

1.1. Приготовить по 3 кг смесей, содержащих 3, 5, 7 и 9% по массе глины. В каждую смесь добавить по 5 % по массе воды (сверх 100 %).

1.2. Определить влажность, газопроницаемость и прочность смесей во влажном состоянии.

2. Определение влияния влаги на свойства смеси.

2.1. Приготовить 4 смеси по 3 кг, содержащих 93 % по массе песка, 7 % глины. В каждую из указанных смесей добавить соответственно 2, 4, 6 и 8 % воды (сверх 100 %).

2.2. Определить влажность, газопроницаемость и прочность смесей во влажном состоянии.

3. Результаты испытаний свойств формовочных смесей занести в табл. 1.5 и 1.6.

4. Для каждого состава смеси повторить опыты не менее трех раз.

5. Определить статистические параметры: среднеарифметические значения измеренных величин, соответствующие дисперсии и доверительные интервалы и уравнения регрессий.

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.

2. Описание методики проведения работы.

3. Таблицы опытных данных и результатов их обработки.

4. Графики влияния содержания глины и влаги на газопроницаемость и прочность смесей.

5. Выводы.

Таблица 1.5

Влияние глины на свойства смесей

№ смеси	Содержание глины, %	Влажность, %	Газопроницаемость, ед.	Предел прочности при сжатии, Па
1	3,0			
2	5,0			
3	7,0			
4	9,0			

Таблица 1.6

Влияние воды на свойства смесей

№ смеси	Введенное количество воды, %	Общее содержание влаги, %	Газопроницаемость, ед.	Предел прочности при сжатии, Па
1	2,0			
2	4,0			
3	6,0			
4	8,0			

Работа 1.3.3. Определение газотворной способности формовочных и стержневых смесей

Цель работы. Изучить методику определения газотворности и зависимость объема выделившихся газов от времени для различных составов смесей.

Оборудование, инструмент, материалы: прибор для определения газотворности, технические весы с разновесами, сушильный шкаф, печь для прокаливания, эксикатор, секундомер, фарфоровые лодочки, щипцы, формовочные и стержневые смеси.

Порядок выполнения работы.

1. Приготовить формовочные или стержневые смеси (составы смесей выдаются преподавателем).

2. Прокалить фарфоровые лодочки при температуре 1000 °С в течении 1 ч и охладить их в эксикаторе. Влажную смесь перед испытанием высушить при 105...110 °С до постоянной массы.

3. Взять навеску ($3,0 \pm 0,012$ г) смеси, предварительно высушенной до постоянной массы и поместить ее в лодочку.

4. Установить лодочку с навеской в трубку предварительно нагретой печи Марса с холодного конца.

5. Пропустить через трубку печи Марса обезвоженный углекислый газ, полученный в аппарате Киппа. Нейтральная атмосфера позволит исключить взаимодействие органических веществ смеси с кислородом.

6. Ввести лодочку с навеской в зону нагрева и плотно закрыть трубку печи Марса.

7. Включить секундомер. Через 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 300, 420 и 600 с по опускающемуся уровню в мерной бюретке определить количество выделившегося газа.

8. Результаты замеров занести в табл. 1.7.

Таблица 1.7

Количество газов, выделившихся из смесей

№ опыта	Количество газов, выделившихся в течении времени, с										Общее количество газов, см ³
	5	10	20	30	60	120	180	300	420	600	

9. Повторить опыты не менее трех раз.

10. Определить статистические параметры: среднеарифметические значения количества газов, выделившихся за указанные промежутки вре-

мени, соответствующие дисперсии и доверительные интервалы. Построить график зависимости «Количество газов – время».

11. Сделать выводы.

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Описание методики определения газотворности смесей.
3. Таблицы опытных данных и результатов их обработки.
4. График, отражающих зависимость объема выделившихся газов от времени.
5. Выводы.

2. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

2.1. Общие сведения

В литейном производстве сплавы подвергают металлургической обработке и заливают в формы при температурах несколько выше точки плавления. При этих условиях расплав по своей структурной упорядоченности приближается к кристаллическому телу, в которое он переходит при понижении температуры. Это подтверждается малой разницей в плотности расплава и затвердевшего металла, небольшом различии в электропроводности, термическом расширении и удельной теплоёмкости, а также данными микрорентгенографических исследований о наличии в расплаве субмикроструктуры с расположением элементарных частиц, подобных кристаллическому состоянию. В жидких металлах имеется так называемый ближний порядок, выражающийся в том, что расположение ближайших соседей каждого атома и их число являются постоянными характеристиками. Микрогруппировки в жидких металлах с таким же расположением атомов, как в кристаллах твёрдого металла, содержащие несколько десятков атомов, называют кластерами. Эти группировки изменяют свои размеры, взаимное расположение, возникают и исчезают в расплаве.

В жидких металлах кроме кластеров обнаружена бесструктурная жидкость. С ростом температуры число кластеров убывает, количество бесструктурной жидкости растёт [6, 7]. Указанная теория кластеров тесно связана с теорией Я. Френкеля, называемой «дырочной» теорией структуры расплава. Эта теория предполагает, что при температурах, близких к точке плавления, происходит определённое увеличение расстояния между ионами, что вызывает появление нарушений в правильном порядке решётки. Несмотря на эти нарушения, сохраняется прочность связей между ионами. Удаление отдельных ионов от своих соседей при сохранении связи с большим числом других ионов уподобляется образованию «дырок» в рас-

плаве. Возникающие «зазоры» в расплаве в определённый момент исчезают, в то время как в других местах образуются новые «зазоры» аналогичного типа [6, 7].

Жидкие металлические сплавы представляют собой сложную систему, содержащую большое количество взвешенных частиц нерастворимых примесей. Во многих случаях металлические расплавы имеют микрогетерогенное строение.

Для производства отливок необходим сплав заданного состава и свойств в жидком состоянии. Создание технологии приготовления металлических расплавов, обеспечивающих высокое качество отливок, с минимальными материальными и трудовыми затратами, невозможно без знания физических и физико-химических свойств жидких металлов и сплавов, без анализа возможных процессов взаимодействия расплавов с газами, с огнеупорными материалами и т.д.

Состав сплавов описывают относительным содержанием компонентов, выражаемым их процентами или долями по массе и мольными процентами или долями.

Для выражения содержания компонентов сплавов в мольных процентах необходимо пользоваться формулой

$$N_i = \frac{C_i / M_i}{C_i / M_i + C_j / M_j + C_k / M_k} \cdot 100, \quad (2.1)$$

где N_i – содержание i -го компонента в сплаве, % мольный; C_i, C_j, C_k – содержание компонентов i, j, k , мас. %; M_i, M_j, M_k – масса 1 моля компонентов, г.

Если в выражении (2.1) опустить множитель 100, то содержание компонента будет в мольных долях.

Для перехода от мольных процентов к процентам по массе необходимо пользоваться следующей формулой:

$$C_i = \frac{N_i \cdot M_i}{N_i \cdot M_i + N_j \cdot M_j + N_k \cdot M_k}. \quad (2.2)$$

Определение массы 1 моля сплава производится по формуле

$$M_{\text{СПЛ}} = N_i \cdot M_i + N_j \cdot M_j + N_k \cdot M_k, \quad (2.3)$$

где $M_{\text{СПЛ}}$ – масса 1 моля сплава, г; N_i, N_j, N_k – содержание компонентов i, j, k в мольных долях; M_i, M_j, M_k – масса 1 моля компонентов, г.

В первом приближении металлические расплавы можно считать идеальными растворами, а твёрдые сплавы – идеальными растворами или механическими смесями. Поэтому удельный объём жидкого или твёрдого сплава можно определить как аддитивную величину, определяемую со-

держанием всех компонентов, выраженных в процентах или долях по массе:

$$V_{\text{СПЛ}} = \frac{C_i \cdot V_i + C_j \cdot V_j + C_k \cdot V_k + \dots}{100}, \quad (2.4)$$

где $V_{\text{СПЛ}}$ – удельный объём сплава, м³/кг или см³/г; C_i, C_j, C_k – содержание компонентов, мас. %; V_i, V_j, V_k – удельный объём компонентов, м³/кг или см³/г.

Поскольку плотность есть величина, обратная удельному объёму ($\rho = 1/V$), для выражения плотности сплава получается следующая зависимость:

$$\rho_{\text{СПЛ}} = \frac{100}{C_i/\rho_i + C_j/\rho_j + C_k/\rho_k}, \quad (2.5)$$

где $\rho_{\text{СПЛ}}$ – плотность сплава, кг/м³ или г/см³; C_i, C_j, C_k – содержание компонентов, мас. %; ρ_i, ρ_j, ρ_k – плотность компонентов, кг/м³ или г/см³.

Плотность металлов и сплавов предопределяет массу заготовки и изделия. Данные о плотности и удельном объёме требуются для определения количества расплава, необходимого для заполнения литейной формы. Знание плотностей расплава и всех добавок позволяет предвидеть их поведение и рационально проводить плавку.

Увеличение плотности расплавов при охлаждении и кристаллизации предопределяет объёмную усадку, которая проявляется в образовании усадочных раковин и пористости в отливках. Рост плотности металла или сплава в твёрдом состоянии приводит к сокращению линейных размеров отливки, т.е. к линейной усадке, которую необходимо учитывать при разработке модельного комплекта.

Расплавы, содержащие компоненты с высоким сродством к кислороду, при плавке и заливке форм способны окисляться. Оксидная плёнка на поверхности расплава может разрываться при движении металла, перемещаться с ним, и служить причиной образования таких дефектов в отливке, как плены, засоры, неспай.

Прочность оксидов, условия их образования и разложения позволяют оценить значение равновесного давления кислорода в системе металл-оксид. Для реакции образования оксида двухвалентного металла



в случае, когда металл и оксид присутствуют в системе в качестве чистых, самостоятельных веществ и не образуют растворов, константа равновесия выражается в виде [3]

$$K_p = \frac{1}{(P_{\text{O}_2})_{\text{MeO}}}. \quad (2.7)$$

Равновесное давление кислорода $(P_{O_2})_{MeO}$ называют упругостью диссоциации оксида, она служит количественной характеристикой химической прочности оксида. Когда давление кислорода в газовой фазе P_{O_2} превышает равновесное давление кислорода $(P_{O_2})_{MeO}$, создаются условия для окисления металла. Если давление кислорода в газовой фазе ниже равновесного, металл не окисляется.

Знание этих величин важно при выборе защитных атмосфер, в которых можно плавить и разливать металл без его окисления.

Величину $(P_{O_2})_{MeO}$ для реакции (2.6) можно определить из стандартного изменения энергии Гиббса:

$$\Delta G_{MeO}^0 = -RT \ln K_p = RT \ln (P_{O_2})_{MeO}. \quad (2.8)$$

Удобной характеристикой термодинамических свойств оксида, особенно для сложных систем, является величина кислородного потенциала оксида $\pi_{O_{(MeO)}}$. Она равна кислородному потенциалу газовой фазы, находящейся в равновесии с оксидной и металлической фазами:

$$\pi_{O_{(MeO)}} = \pi_{O_{(г.ф)}} = RT \ln (P_{O_2})_{MeO}. \quad (2.9)$$

Протекание химических реакций термодинамически вероятно только при отрицательных значениях энергии Гиббса и кислородного потенциала. Чем прочнее оксид металла, тем меньше величина $(P_{O_2})_{MeO}$ и тем более отрицательное значение ΔG^0 для реакции его образования. Используя значения ΔG^0 для реакций образования различных оксидов, можно сравнивать их прочность при различных температурах. Характеристики химической прочности оксида изменяются в случае образования растворов в системе Me–MeO или газовой фазы, в состав которой, наряду с кислородом, входят пары Me или MeO. В этом случае константа равновесия реакции (2.6) выразится через активности реагирующих веществ в следующем виде:

$$K_p = \frac{a_{MeO}^2}{a_{Me}^2 \cdot (P_{O_2})_{MeO}}. \quad (2.10)$$

Из этого выражения следует, что

$$(P_{O_2})_{MeO} = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{a_{MeO}^2}{a_{Me}^2}. \quad (2.11)$$

Для количественных расчётов удобно употреблять значения кислородного потенциала оксида.

$$\pi_{O_{(MeO)}} = -RT \ln K_p + 2RT \ln a_{MeO} - 2RT \ln a_{Me} \quad (2.12)$$

или

$$\pi_{O_{(MeO)}} = \Delta G_{MeO}^0 + 2RT \ln a_{MeO} - 2RT \ln a_{Me}. \quad (2.13)$$

Для случая образования оксидов металлов различной валентности реакция образования оксида Me_xO_y в расчёте на один моль O_2 запишется в виде



где стехиометрические коэффициенты m и n следующие: $m = 2X/Y$; $n = 2/Y$.

Тогда уравнение (2.13) для кислородного потенциала оксида общего вида Me_xO_y примет вид

$$\pi_{O_{(Me_xO_y)}} = \Delta G_{Me_xO_y}^0 + \frac{2}{Y} RT \ln a_{Me_xO_y} - 2 \frac{X}{Y} RT \ln a_{Me}. \quad (2.15)$$

Плавление металлов всегда сопровождается испарением. Давление пара металла при температуре плавления является важным свойством для оценки поведения металла.

Парциальное давление i -го компонента сплава в газовой фазе равно:

$$P_i = P_i^0 \cdot N_i \cdot \gamma_i, \quad (2.16)$$

где P_i – парциальное давление i -го компонента сплава, Па; P_i^0 – давление пара чистого компонента, Па; N_i – мольная доля i -го компонента в сплаве; γ_i – коэффициент активности компонента.

Общее давление компонентов сплава определяют как сумму парциальных давлений его компонентов. Масса компонента, находящегося в газовой фазе, равна

$$m_i^{\text{газ}} = n_i M_i, \quad (2.17)$$

где $m_i^{\text{газ}}$ – масса компонента, г; n_i – количество молей данного компонента в паровой фазе, моль; M_i – мольная масса, г/моль.

Величина n_i определяется из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$n_i = P_i V / RT, \quad (2.18)$$

где n_i – количество молей компонента в паровой фазе, моль; P_i – парциальное давление i -го компонента, Па; V – объём паровой фазы, m^3 ; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль·К; T – температура, К.

Для определения количества испарившегося вещества в вакууме (с остаточным внешним давлением менее 10 Па) при плавке чистого металла используется уравнение Лэнгмюра:

$$m = P^0 \cdot S \cdot \tau \sqrt{M / 2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}, \quad (2.19)$$

где m – масса испарившегося вещества, кг; P^0 – давление пара вещества, Па; S – площадь испарения, m^2 ; τ – время испарения, с; M – молярная масса металла (пары металлов одноатомны), кг/моль; R – газовая постоянная, Дж/моль К; T – температура, К.

При определении массы какого-либо компонента сплава, испарившегося из расплава, необходимо учитывать его парциальное давление, тогда уравнение (2.19) запишется в виде

$$m_i = P_i \cdot S \cdot \tau \sqrt{M / 2 \cdot \pi \cdot R \cdot T}, \quad (2.20)$$

где m_i – масса i -го компонента, испарившегося из расплава, кг; P_i – парциальное давление i -го компонента сплава в расплаве, Па.

Учитывая, что в условиях испарения молярная доля компонента является переменной величиной, скорость испарения достоверно можно рассчитать только в начальный момент времени, когда известен заданный состав сплава. В последующем необходимо проводить корректировку молярной доли компонента в сплаве с учётом уже испарившегося вещества. Однако, для технических расчётов при небольшой продолжительности процесса изменением состава сплава вследствие различной скорости испарения его компонентов можно пренебречь.

Чтобы определить потери сплава за счёт испарения в вакууме, необходимо сложить потери испарением всех его компонентов.

Испарение расплава происходит до тех пор, пока давление его паров над расплавом не достигнет давления насыщенного пара. В этот момент между расплавом и его парами наступает равновесие: количество молекул, переходящих из расплава в пространство над ним, равно количеству молекул, переходящих в расплав из окружающего пространства.

Если давление насыщенного пара достигнет величины внешнего давления, то происходит кипение во всем объёме расплава.

В расплавах всегда содержится то или иное количество газов. Под газами в металлах понимают вещества или их соединения, находящиеся в свободном состоянии в газообразном виде. При выделении из раствора газы образуют пузырьки.

Давление в газовом пузырьке определяется по выражению

$$P_{\text{пуз}} = P_{\text{Ме}} + P_{\sigma} + P_{\text{вн}}, \quad (2.21)$$

где $P_{\text{пуз}}$ – давление газа в пузырьке, Па; $P_{\text{Ме}}$ – металлостатическое давление, Па; P_{σ} – давление, связанное с межфазным натяжением на границе расплав-газ, Па; $P_{\text{вн}}$ – внешнее давление над расплавом, Па.

Металлостатическое давление определяется по формуле

$$P_{Me} = \rho \cdot g \cdot h, \quad (2.22)$$

где ρ – плотность расплава, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – глубина, на которой образовался газовый пузырёк, м.

Давление, связанное с межфазным натяжением, определяется по формуле

$$P_{\sigma} = \frac{2\sigma}{r}, \quad (2.23)$$

где σ – поверхностное натяжение по границе расплав–газ (межфазная энергия), Дж/м²; r – радиус пузырька, м.

Количество газов в металлах определяется чаще всего в процентах по массе и в числе см³ на 100 г металла. Взаимный пересчёт этих величин производится по формуле

$$C = 4,464 \cdot 10^{-5} \cdot N \cdot M, \quad (2.24)$$

где C – содержание газа в металле, % масс.; N – содержание газа в металле, см³/100 г; M – молярная масса газа, г/моль.

При производстве отливок очень важное значение имеет полное заполнение формы расплавленным металлом. Этот процесс непосредственно зависит от таких свойств расплава, как вязкость и поверхностное натяжение.

Вязкость, или внутреннее трение, представляет собой внутреннее сопротивление, оказываемое взаимному перемещению смежных слоёв жидкости. Количественным выражением вязкости является коэффициент динамической вязкости η , который представляет собой отношение касательного напряжения τ , действующего между слоями текущего вещества в направлении его движения к величине градиента скорости dV/dy , перпендикулярного к потоку:

$$\eta = \frac{\tau}{dV/dy}. \quad (2.25)$$

Здесь τ можно представить как отношение силы взаимодействия двух движущихся слоёв F к площади их соприкосновения S :

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (2.26)$$

Коэффициент динамической вязкости в СИ измеряется в Н·с/м² = Па·с. Вспомогательной единицей динамической вязкости является Пуаз (П), 1П = 0,1 Па·с. Когда градиент скорости между слоями текущего вещества является величиной постоянной, выражение (1.25) можно представить в виде

$$\eta = \frac{F \cdot l}{S \cdot V}, \quad (2.27)$$

где η – коэффициент динамической вязкости, Па·с; F – сила взаимодействия между слоями текущего вещества, Н; l – расстояние между слоями, м; S – площадь взаимодействия слоёв, м²; V – скорость движения одного слоя относительно другого, м/с.

Отношение динамической вязкости расплава к плотности называется кинематической вязкостью и определяется по формуле

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2.28)$$

где ν – кинематическая вязкость, м²/с; η – динамическая вязкость, Па·с; ρ – плотность, кг/м³.

Вспомогательной единицей измерения кинематической вязкости является Стокс (Ст). 1Ст = 10⁻⁴ м²/с.

Вязкость сложных расплавов, близких к идеальным, можно рассчитывать, применяя правило аддитивности:

$$\eta_{\text{СПЛ}} = \sum C_i \cdot \eta_i, \quad (2.29)$$

где $\eta_{\text{СПЛ}}$ – вязкость жидкого сплава, Па·с; C_i – содержание компонентов (в долях); η_i – соответствующие вязкости чистых компонентов, Па·с.

Вязкость дисперсных систем малой концентрации, при условии отсутствия взаимодействия между частицами, можно вычислить по формуле А. Эйнштейна:

$$\eta_c = \eta_0 (1 + 2,5 \cdot \varphi), \quad (2.30)$$

где η_c – вязкость дисперсной системы, Па·с; η_0 – вязкость чистой (без включений) среды, Па·с; $\varphi = n \cdot V$ – объёмная доля дисперсной фазы; V – объём одной сферической частицы, м³; n – численная концентрация частиц, 1/м³.

$$n = N/V_1, \quad (2.31)$$

где N – число частиц; V_1 – объём дисперсной среды, м³.

В спокойном расплаве, при ламинарном характере обтекания частицы скорость всплывания неметаллических включений зависит от вязкости и определяется по формуле Стокса (для частиц размером менее 0,1 мм):

$$\upsilon = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{\text{МЕ}} - \rho_{\text{ВКЛ}}}{\eta}, \quad (2.32)$$

где υ – скорость всплывания, м/с; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²; r – радиус включений, м; $\rho_{\text{МЕ}}$ и $\rho_{\text{ВКЛ}}$ – соответственно плотности металла и включения, кг/м³; η – динамическая вязкость расплава, Па·с.

Величина вязкости расплава связана с коэффициентом диффузии уравнением Стокса-Эйнштейна:

$$D = RT / 6 \cdot \pi \cdot r \cdot N \cdot \eta, \quad (2.33)$$

где D – коэффициент самодиффузии, $\text{м}^2/\text{с}$; R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$; T – температура, К ; η – динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; r – радиус диффундирующей частицы, м ; N – число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$).

Для сильно разбавленных растворов коэффициент самодиффузии и коэффициент диффузии в данном уравнении совпадают.

Отдельные атомы внутри расплава связаны между собой взаимно уравновешивающими силами. Однако на поверхности расплава, где жидкость контактирует с другой средой (газовой фазой, стенкой формы), атомы металла имеют меньше соседей и возникают силы поверхностного натяжения, направленные внутрь расплава, перпендикулярно к поверхности.

Поверхностное натяжение σ соответствует силе F , которую необходимо приложить, чтобы увеличить периметр поверхности расплава на единицу длины l , или работе A , которую необходимо произвести для увеличения поверхности жидкости S на единицу площади:

$$\sigma = \frac{dF}{dl} \quad (2.34)$$

или

$$\sigma = \frac{dA}{dS}. \quad (2.35)$$

Следовательно, поверхностное натяжение измеряется в $\text{Н}/\text{м}$ или в $\text{Дж}/\text{м}^2$.

Коэффициент поверхностного натяжения влияет на смачиваемость формы расплавом. Смачивание формы способствует, с одной стороны, проникновению металла в поры поверхности формы и образованию пригара на отливках, с другой стороны, более полному заполнению тонких сечений отливок и получению более точного отпечатка полости формы. Смачиваемость характеризуется краевым углом смачивания.

При взаимодействии расплава с какой-либо поверхностью (материалом формы, шлаком) и в случае сохранения равновесия поверхностных натяжений будет сформирована капля. Схема смачивания жидкостью поверхности твёрдого тела представлена на рис. 2.1.

Краевой угол смачивания при этом будет выражаться в виде

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{ТГ}} - \sigma_{\text{ЖТ}}}{\sigma_{\text{ЖГ}}}, \quad (2.36)$$

где θ – краевой угол смачивания жидкостью твёрдого тела, град.; $\sigma_{\text{ТГ}}$, $\sigma_{\text{ЖТ}}$, $\sigma_{\text{ЖГ}}$ – коэффициенты поверхностного натяжения соответственно на границе твёрдого тела и газовой фазы, жидкости и твёрдого тела, жидкости и газовой формы, $\text{Н}/\text{м}$ или $\text{Дж}/\text{м}^2$.

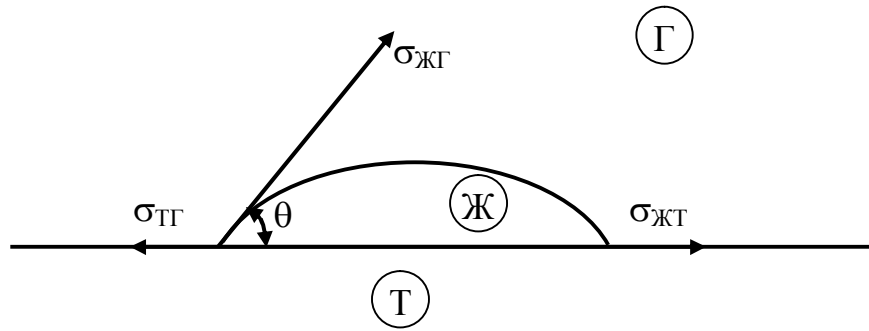


Рис. 2.1. Схема смачивания жидкостью поверхности твёрдого тела: Ж – жидкость (расплав); Т – твёрдое тело (форма, шлак); Г – газовая фаза (воздух)

Если $\theta < 90^\circ$, то жидкость смачивает твёрдое тело, если $\theta > 90^\circ$, то не смачивает.

Величина поверхностного натяжения и краевого угол смачивания определяют работу адгезии W_a жидкости к твёрдой поверхности:

$$W_a = \sigma_{ЖГ} + \sigma_{ТГ} - \sigma_{ЖТ} \quad (2.37)$$

или

$$W_a = \sigma_{ЖГ} (1 + \cos \theta). \quad (2.38)$$

Здесь W_a – удельная работа адгезии жидкости к твёрдой поверхности, Дж/м². Остальные величины такие же, как в формуле (2.36).

Поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой фазой $\sigma_{ЖГ}$ часто называют просто поверхностным натяжением жидкости σ .

Работа адгезии, характеризующая сцепление металлического расплава со стенкой формы, в значительной степени определяет чистоту поверхности отливки. Чем больше работа адгезии, тем сильнее сцепление расплава с формой.

Высота поднятия (опускания) жидкости в капилляре, например, расплава в порах литейной формы, определяется из условия равенства капиллярного давления и металлостатического давления столба расплава:

$$h = \frac{2\sigma}{r \cdot g \cdot \rho} \cos \theta, \quad (2.39)$$

где h – высота поднятия жидкости в капилляре, м; σ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; r – радиус капилляра, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность жидкости, кг/м³; θ – краевой угол смачивания жидкостью поверхности капилляра, град.

Течение металла в форме сопровождается его охлаждением. При охлаждении ниже температуры ликвидус образуются кристаллы, по мере нако-

пления которых скорость течения уменьшается, а затем течение прекращается.

Различные сплавы при сравнимых тепловых и одинаковых гидравлических условиях обладают разной способностью течь и заполнять литейную форму. Способность металлов и сплавов в жидком состоянии течь по каналам литейной формы, заполнять её полости и чётко воспроизводить контуры отливки называется жидкотекучестью. Жидкотекучесть зависит от многих физико-химических свойств сплавов, а также ряда внешних факторов, связанных со свойствами формы и условиями заливки. При сравнении жидкотекучести разных металлов и сплавов различают нулевую, истинную, условную и практическую жидкотекучести.

Нулевая жидкотекучесть достигается, когда металл перестаёт течь, находясь только под статическим напором. Для сплавов она наступает в интервале ликвидус-солидус, когда вязкость сплава резко возрастает из-за образования заметного количества твёрдой фазы (20...30 %). Для чистых металлов температура нулевой жидкотекучести равна температуре плавления.

Под истинной следует понимать ту жидкотекучесть, которая определяется для разных металлов и сплавов при одинаковом перегреве над температурой нулевой жидкотекучести. Во многих случаях (в том числе в производственных условиях) трудно установить температуру нулевой жидкотекучести, и соответственно определить истинную жидкотекучесть.

Поэтому определяют жидкотекучесть при одинаковом перегреве над температурой ликвидус сплава. Такую жидкотекучесть называют условной.

Практическая жидкотекучесть сплавов определяется при постоянной температуре заливки. В практике литейного производства для определения жидкотекучести используют так называемые пробы на жидкотекучесть, которые представляют собой канал малого сечения, заполненная длина которого является мерой жидкотекучести.

Некоторые справочные данные по физическим и технологическим свойствам цветных металлов и сплавов представлены в приложениях 1 и 2.

2.2. Варианты контрольных заданий

Задание 2.2.1. Расчёт температурной зависимости плотности расплава и объёма печи для выплавки необходимой массы расплава

В соответствии с вариантами задания (табл. 2.1) определить температурную зависимость плотности и рассчитать минимальный объём тигля печи для выплавки жаропрочного никелевого сплава.

При расчётах использовать следующие зависимости:

$$\rho^{\text{Ni}} = 9,338 - 1,036 \cdot 10^{-3}t;$$

$$\rho^{\text{Cr}} = 7,87 - 9,1 \cdot 10^{-4}t;$$

$$\rho^{\text{Co}} = 9,23 - 1,02 \cdot 10^{-3}t;$$

$$\rho^{\text{Ti}} = 4,1 - 1,14 \cdot 10^{-3}(t-1680);$$

$$\rho^{\text{Al}} = 2,567 - 3,21 \cdot 10^{-4}t;$$

где ρ – плотность элементов никелевого сплава, г/см³; t – температура, °С.

Таблица 2.1

Варианты задания 2.2.1

№ варианта	Масса сплава, кг	Химический состав сплава, %*				Температура, °С
		Cr	Co	Ti	Al	
Пример	120	12	9	2	5	1550; 1600; 1650; 1670
1	10	12	9	2	5	1560; 1580; 1590; 1600
2	15	12	9	–	5	1570; 1590; 1600; 1610
3	20	12	9	–	–	1550; 1560; 1570; 1580
4	30	12	9	2	5	1610; 1620; 1630; 1640
5	40	10	10	–	3	1600; 1605; 1610; 1615
6	50	13	10	–	4	1550; 1555; 1560; 1565
7	60	15	10	2	5	1565; 1575; 1585; 1595
8	70	14	8	3	6	1580; 1590; 1600; 1610
9	80	9	5	1	5	1570; 1575; 1580; 1585
10	90	8	5	2	1	1560; 1570; 1580; 1590
11	100	10	7	1	2	1590; 1595; 1600; 1605
12	110	12	8	2	–	1630; 1640; 1650; 1660
13	130	12	9	4	5	1625; 1630; 1635; 1640
14	140	15	8	–	3	1645; 1650; 1655; 1660
15	150	13	7	3	6	1550; 1580; 1620; 1650
16	160	15	8	–	–	1560; 1590; 1620; 1660
17	170	20	10	–	–	1550; 1590; 1630; 1670
18	180	15	5	1	3	1570; 1610; 1650; 1670
19	190	15	5	–	–	1580; 1600; 1620; 1640
20	200	13	10	2	5	1590; 1630; 1650; 1675

* Остальное никель.

Пример выполнения задания 2.2.1 (вариант «Пример» в табл. 2.1).

1. Рассчитываем плотность компонентов сплава при различных температурах.

При 1550 °С

$$\rho^{\text{Ni}}_{1550\text{ °С}} = 9,338 - 1,036 \cdot 10^{-3} \cdot 1550 = 7,732 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1550\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Cr}} = 7,87 - 9,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1550 = 6,460 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1550\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Co}} = 9,23 - 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 1550 = 7,649 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1550\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Ti}} = 4,1 - 1,14 \cdot 10^{-3} (1550 - 1680) = 4,248 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1550\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 2,567 - 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot 1550 = 2,078 \text{ г/см}^3.$$

При 1600 °С

$$\rho_{1600\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Ni}} = 9,338 - 1,036 \cdot 10^{-3} \cdot 1600 = 7,680 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1600\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Cr}} = 7,87 - 9,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1600 = 6,414 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1600\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Co}} = 9,23 - 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 1600 = 7,598 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1600\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Ti}} = 4,1 - 1,14 \cdot 10^{-3} (1600 - 1680) = 4,191 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1600\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 2,567 - 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot 1600 = 2,062 \text{ г/см}^3.$$

При 1650 °С

$$\rho_{1650\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Ni}} = 9,338 - 1,036 \cdot 10^{-3} \cdot 1650 = 7,629 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1650\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Cr}} = 7,87 - 9,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1650 = 6,369 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1650\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Co}} = 9,23 - 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 1650 = 7,547 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1650\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Ti}} = 4,1 - 1,14 \cdot 10^{-3} (1650 - 1680) = 4,134 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1650\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 2,567 - 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot 1650 = 2,046 \text{ г/см}^3.$$

При 1670 °С

$$\rho_{1670\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Ni}} = 9,338 - 1,036 \cdot 10^{-3} \cdot 1670 = 7,608 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1670\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Cr}} = 7,87 - 9,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1670 = 6,350 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1670\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Co}} = 9,23 - 1,02 \cdot 10^{-3} \cdot 1670 = 7,527 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1670\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Ti}} = 4,1 - 1,14 \cdot 10^{-3} (1670 - 1680) = 4,111 \text{ г/см}^3;$$

$$\rho_{1670\text{ }^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 2,567 - 3,21 \cdot 10^{-4} \cdot 1670 = 2,040 \text{ г/см}^3.$$

2. По формуле (2.5) определяем плотность сплава при различных температурах.

При 1550 °С

$$\rho_{1550\text{ }^{\circ}\text{C}} = \frac{100}{\frac{72}{7,732} + \frac{12}{6,460} + \frac{9}{7,649} + \frac{2}{4,248} + \frac{5}{2,078}} = 6,569 \text{ г/см}^3.$$

При 1600 °С

$$\rho_{1600^{\circ}\text{C}} = \frac{100}{\frac{72}{7,680} + \frac{12}{6,414} + \frac{9}{7,598} + \frac{2}{4,191} + \frac{5}{2,062}} = 6,522 \text{ г/см}^3.$$

При 1650 °С

$$\rho_{1650^{\circ}\text{C}} = \frac{100}{\frac{72}{7,629} + \frac{12}{6,369} + \frac{9}{7,547} + \frac{2}{4,134} + \frac{5}{2,046}} = 6,475 \text{ г/см}^3.$$

При 1670 °С

$$\rho_{1670^{\circ}\text{C}} = \frac{100}{\frac{72}{7,608} + \frac{12}{6,350} + \frac{9}{7,527} + \frac{2}{4,111} + \frac{5}{2,040}} = 6,452 \text{ г/см}^3.$$

3. Результаты расчётов сведём в табл. 2.2 и представим в виде графика зависимости $\rho_{\text{СПЛ}} = f(t)$ на рис. 2.2.

Таблица 2.2

Результаты расчётов плотности компонентов и сплава

Температура, °С	Плотность компонентов сплава, г/см ³					Плотность сплава, г/см ³
	Ni	Cr	Co	Ti	Al	
1550	7,732	6,460	7,649	4,248	2,078	6,569
1600	7,680	6,414	7,598	4,191	2,062	6,522
1650	7,629	6,369	7,547	4,134	2,046	6,475
1670	7,608	6,350	7,527	4,111	2,040	6,452

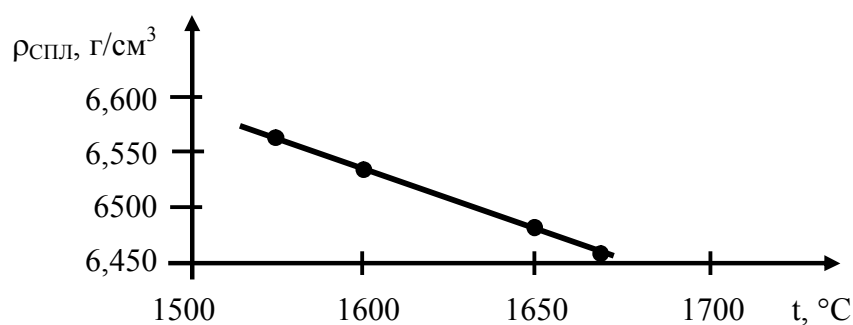


Рис. 2.2. График зависимости $\rho_{\text{СПЛ}} = f(t)$

4. Рассчитаем минимальный объём тигля для выплавки заданной массы расплава. Учитывая, что наибольший объём расплава соответствует минимальной плотности,

$$V_T = \frac{m_{\text{СПЛ}}}{\rho_{\text{СПЛ}}} = \frac{120000}{6,452} = 18599 \text{ см}^3.$$

Принимаем объём тигля 19000 см³.

Вывод: плотность сплава линейно зависит от его температуры, при этом с увеличением температуры плотность никелевого сплава уменьшается. Для выплавки 120 кг сплава необходим тигель ёмкостью 190000 см³.

Задание 2.2.2. Расчёт зависимости скорости испарения металла в вакууме от температуры и его потерь при вакуумной плавке

В соответствии с вариантами задания (табл. 2.3) рассчитать зависимость скорости испарения в вакууме (υ) металлов: Cu, Al, Zn и их потерь (Π) при вакуумной плавке. Построить графики $\upsilon = f(t)$ и $\Pi = f(t)$ для каждого из металлов. Сделать вывод о влиянии природы металла и температуры (t) на интенсивность испарения металлов в вакууме. При расчётах использовать зависимость, представленную в табл. 2.4.

Таблица 2.3

Варианты задания 2.2.2

№ варианта	Масса сплава, кг	Параметры тигля, м			Продолжительность плавки, мин
		Длина	Ширина	Диаметр	
Пример	40	–	–	0,10	20
1.1	10	–	–	0,05	10
1.2	20	–	–	0,08	15
1.3	30	–	–	0,10	18
1.4	50	–	–	0,15	25
1.5	60	–	–	0,20	30
1.6	5	0,10	0,10	–	8
1.7	12	0,15	0,10	–	12
1.8	14	0,20	0,10	–	14
1.9	16	0,20	0,15	–	16
1.10	18	0,15	0,15	–	18
1.11	22	–	–	0,15	20
1.12	24	–	–	0,18	22
1.13	26	–	–	0,20	25
1.14	2	0,05	0,05	–	5
1.15	4	0,08	0,05	–	8
1.16	6	0,08	0,08	–	10
1.17	8	0,10	0,10	–	12
1.18	11	–	–	0,10	14
1.19	13	–	–	0,15	16
1.20	16	–	–	0,15	18

Таблица 2.4

Зависимость $P = f(t)$ для Cu, Zn, Al

Параметр	Металл											
	Медь				Цинк				Алюминий			
t, °C	1227	1250	1270	1300	430	450	470	500	700	720	740	760
P, Па	5	8	9	10	7	11	13	15	0,1	0,3	0,4	0,6

Пример выполнения задания 2.2.2 (вариант «Пример» в табл. 2.4).

Определим площадь поверхности, с которой происходит испарение металла в вакууме:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Рассчитаем скорость испарения, массу испарившегося металла и потери при вакуумной плавке для различных температур. Учитывая, что массу испарившегося металла можно определить по формуле

$$m = \nu \tau S, \quad (2.40)$$

и принимая во внимание уравнение Лэнгмюра (2.19), скорость испарения рассчитаем по выражению

$$\nu = P \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}. \quad (2.41)$$

При этом потери металла будут рассчитываться:

$$\Pi = \frac{m}{m_p} \cdot 100\%, \quad (2.42)$$

где m_p – масса расплава, кг.

а) Для меди ($M = 0,064$ кг/моль) при 1227°C

$$\nu_{1227^\circ\text{C}}^{\text{Cu}} = 5 \sqrt{\frac{0,064}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 1500}} = 0,0045 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{1227^\circ\text{C}}^{\text{Cu}} = 0,0045 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,042 \text{ кг};$$

$$\Pi_{1227^\circ\text{C}}^{\text{Cu}} = \frac{0,042}{40} \cdot 100 = 0,11 \text{ \%}.$$

При 1250°C

$$\nu_{1250^\circ\text{C}}^{\text{Cu}} = 8 \sqrt{\frac{0,064}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 1523}} = 0,0072 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{1250^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = 0,0072 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,068 \text{ кг};$$

$$\Pi_{1250^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = \frac{0,068}{40} \cdot 100 = 0,17 \text{ \%}.$$

При 1270 °С

$$v_{1270^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = 9 \sqrt{\frac{0,064}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 1543}} = 0,0075 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{1270^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = 0,0075 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,071 \text{ кг};$$

$$\Pi_{1270^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = \frac{0,071}{40} \cdot 100 = 0,18 \text{ \%}.$$

При 1300 °С

$$v_{1300^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = 10 \sqrt{\frac{0,064}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 1573}} = 0,0084 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{1270^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = 0,0084 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,079 \text{ кг};$$

$$\Pi_{1270^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = \frac{0,079}{40} \cdot 100 = 0,2 \text{ \%}.$$

б) Для цинка ($M = 0,065$ кг/моль) при 430 °С

$$v_{430^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 7 \sqrt{\frac{0,065}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 703}} = 0,0091 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{430^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 0,0091 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,0857 \text{ кг};$$

$$\Pi_{430^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = \frac{0,0857}{40} \cdot 100 = 0,21 \text{ \%}.$$

При 450 °С

$$v_{450^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 11 \sqrt{\frac{0,065}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 723}} = 0,0143 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{450^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 0,0143 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,1347 \text{ кг};$$

$$\Pi_{450^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = \frac{0,1347}{40} \cdot 100 = 0,34 \text{ \%}.$$

При 470 °С

$$v_{470^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 13 \sqrt{\frac{0,065}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 743}} = 0,0164 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{470^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 0,0164 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,1545 \text{ кг};$$

$$\Pi_{470^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = \frac{0,1545}{40} \cdot 100 = 0,39 \text{ \%}.$$

При 500 °С

$$v_{500^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 15 \sqrt{\frac{0,065}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 773}} = 0,020 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{500^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = 0,020 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,1884 \text{ кг};$$

$$\Pi_{500^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = \frac{0,1884}{40} \cdot 100 = 0,47 \text{ \%}.$$

в) Для алюминия ($M = 0,027$ кг/моль) при 700 °С

$$v_{700^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 0,1 \sqrt{\frac{0,027}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 973}} = 0,000071 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

$$m_{700^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 0,000071 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,000669 \text{ кг};$$

$$\Pi_{700^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = \frac{0,000669}{40} \cdot 100 = 0,0017 \text{ \%}.$$

При 720 °С

$$v_{720^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 0,3 \sqrt{\frac{0,027}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 993}} = 0,000212 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

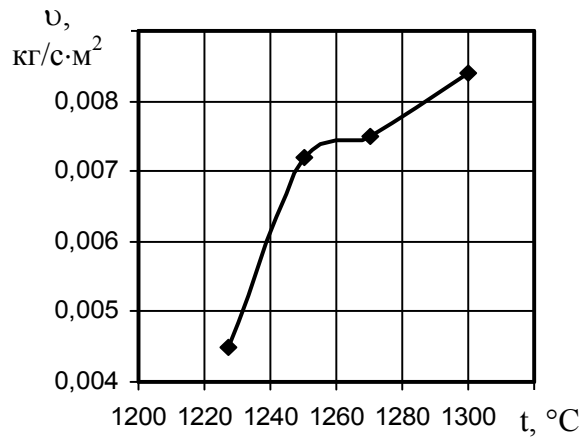
$$m_{720^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 0,000212 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,002 \text{ кг};$$

$$\Pi_{720^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = \frac{0,002}{40} \cdot 100 = 0,005 \text{ \%}.$$

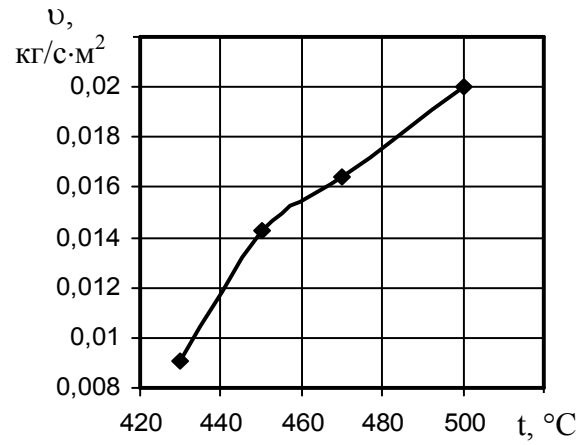
При 740 °С

$$v_{740^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 0,4 \sqrt{\frac{0,027}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,31 \cdot 1013}} = 0,000283 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2};$$

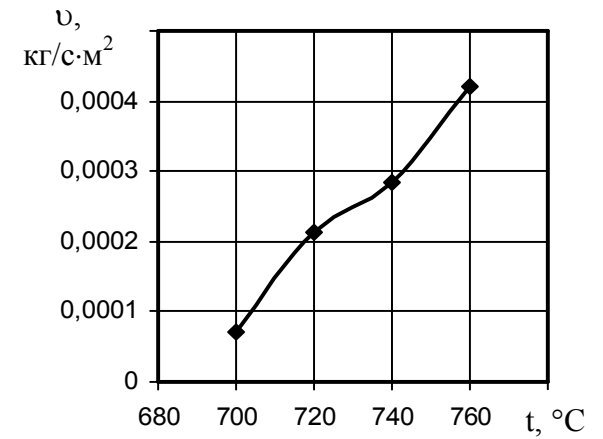
$$m_{740^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = 0,000283 \cdot 1200 \cdot 7,85 \cdot 10^{-3} = 0,0027 \text{ кг};$$



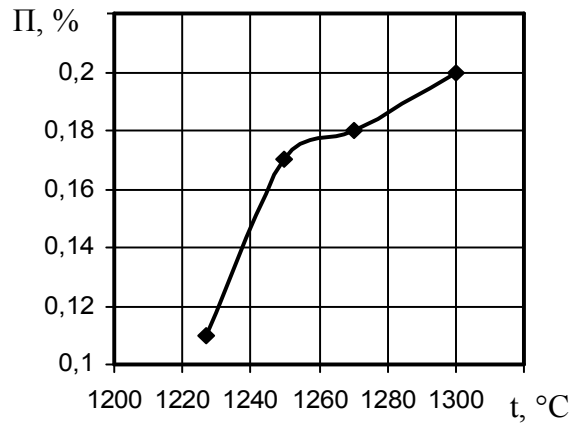
$$\nu_{t,^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = f(T)$$



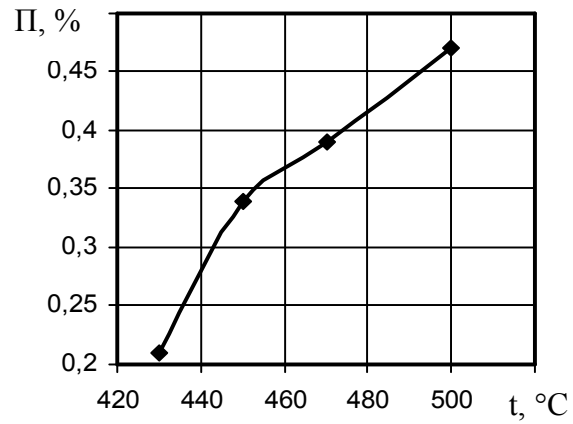
$$\nu_{t,^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = f(T)$$



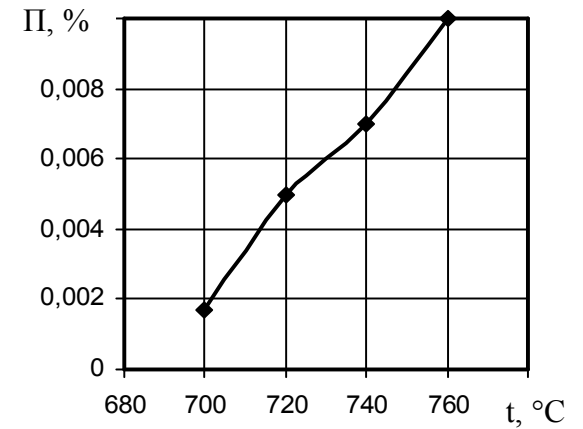
$$\nu_{t,^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = f(T)$$



$$\Pi_{t,^{\circ}\text{C}}^{\text{Cu}} = f(T)$$



$$\Pi_{t,^{\circ}\text{C}}^{\text{Zn}} = f(T)$$



$$\Pi_{t,^{\circ}\text{C}}^{\text{Al}} = f(T)$$

Рис. 2.3. Графики зависимостей $\nu = f(T)$ и $\Pi = f(T)$ для Cu, Zn, Al

2.3. Лабораторные работы

2.3.1. Жидкотекучесть литейных сплавов

Цель работы. Освоить методику определения жидкотекучести литейного сплава.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь СШОЛ со стальным тиглем; потенциометр; термопара погружения ХА; ковш; модельная оснастка для получения спиральной пробы; опоки; формовочный инструмент; лабораторные бегуны; сантиметр; чушки сплава АК12, формовочная смесь.

Порядок выполнения работы.

1. Подготовить рабочее место.
2. Набрать необходимую формовочную оснастку и инструмент.
3. Приготовить формовочную смесь.
4. Изготовить три формы для определения жидкотекучести (рис. 2.4).

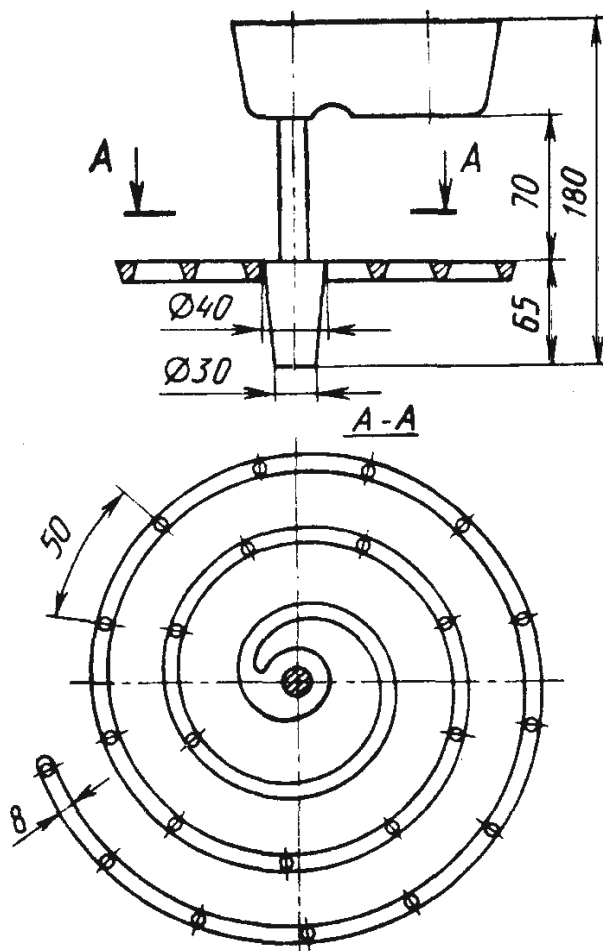


Рис. 2.4. Проба для определения жидкотекучести сплавов

5. Приготовить алюминиевый сплав, перегреть его до температуры 720 °С.

6. Залить формы сплавом, охладить отливки до комнатной температуры.

7. Очистить отливки от формовочной смеси и измерить длину спирали. Данные представить в виде табл. 2.6.

Таблица 2.6

Жидкотекучесть сплавов

Марка сплава	Номер пробы	$T_{пл}$, °С	$T_{заль}$, °С	Жидкотекучесть, мм
Среднее значение:				

Содержание отчета.

1. Название и цель работы.
2. Оборудование инструмент и материалы.
3. Понятие и описание методики определения жидкотекучести.
4. Экспериментальные данные.
5. Выводы

Работа 2.3.2. Определение плотности металлических расплавов

Цель работы. Изучение метода определения влияния температуры на плотность металлических расплавов.

Оборудование, инструмент, материалы: лабораторная установка (рис. 2.5), графитовая изложница, набор инструментов для выплавки и разлива металла, металлы и сплавы, плотность которых требуется определить.

Порядок проведения работы.

1. Отградуировать шкалу электронного потенциометра, последовательно подвешивая на стержень механотрона гири массой от 1 до 5 г и записывая в рабочий журнал показания потенциометра (табл. 2.7) в милливольттах. Каждое измерение повторить 3–5 раз.

Таблица 2.7

Показания потенциометра при различных нагрузках на стержень механотрона

Нагрузка на стержень механотрона, г	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
Показания потенциометра, мВ					

2. Построить градуировочную кривую в координатах граммы-милливольты.

3. Определить на воздухе массу груза с молибденовой проволокой подвешиванием их к механотрону. Показания потенциометра в милливольтках записать в журнал. Определение повторить 5–7 раз.

4. По градуировочной кривой определить массу груза. Результаты опытов занести в журнал.

5. Навеску исследуемого материала или сплава массой 250...300 г загрузить в графитошамотный тигель. Установить тигель в печь и включить ее на нагрев.

6. Навеску расплавить и перегреть расплав на 20...30 °С выше температуры ликвидуса. Шлак с поверхности расплава удалить.

7. Опустить в расплав рениевый груз на глубину 10...20 мм ниже зеркала расплава и выдержать его в течение 5 мин при заданной температуре.

8. Изменить температуру перегрева расплава на заданную величину. Для каждого изменения температуры определить массу груза в расплаве. Каждое определение повторить 5–7 раз. Температуру повышать со скоростью 2...3 °С/мин. Результаты опытов занести в журнал.

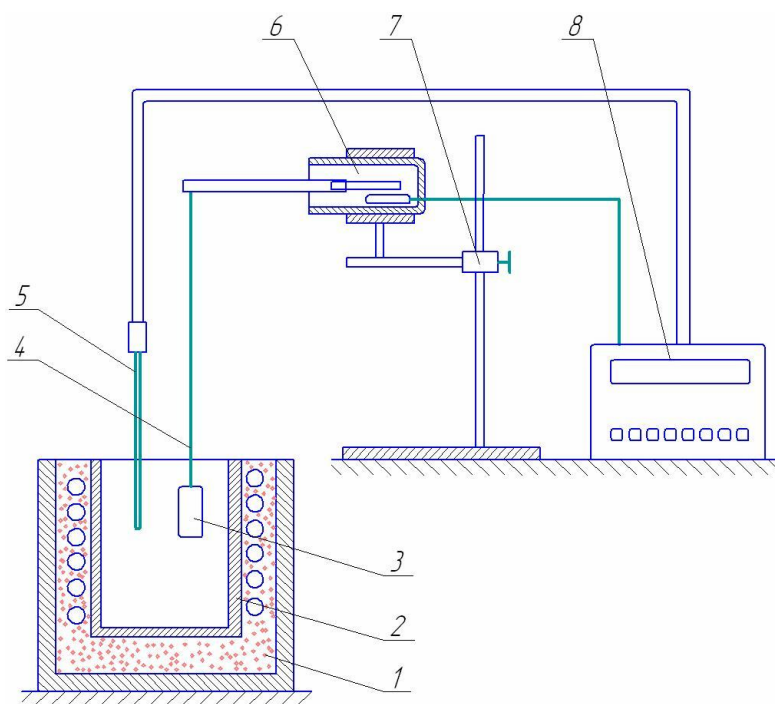


Рис. 2.5. Лабораторная установка для определения плотности металлических расплавов:

1 – печь сопротивления; 2 – графитовый тигель;

3 – проволока молибденовая;

4 – груз рениевый; 5 – термопара хромель-алюмелевая;

6 – механотронный преобразователь усилий;

7 – механизм опускания груза;

8 – система отсчетно-измерительная с электронным потенциометром

Результаты наблюдений и их обработка.

1. Результаты определений массы груза на воздухе и в расплаве статистически обработать. Найти доверительный интервал при вероятности 0,95. Построить графическую зависимость плотности расплава от температуры. Результаты определения плотности, вычисленные по формуле, внести в табл.2.8.

Таблица 2.8

Зависимость плотности расплава от температуры перегрева

Температура расплава, °С	Показания потенциометра, мВ	Масса груза, г		Масса, расплава, вытесненная грузом, г	Плотность расплава $\rho_{ж}$, г/см ³
		На воздухе G_1	В расплаве G_2		

2. Определить статистические параметры: среднеарифметические значения G_1 и G_2 , соответствующие дисперсии и доверительные интервалы.

3. Экстраполируя прямую изменения плотности от температуры, определить плотность жидкого металла при температуре плавления жидкого металла и сравнить ее со справочными данными.

Содержание отчета.

1. Краткие сведения о методике проведения работы.
2. Схема механотрона.
3. Таблица.
4. Графики и выводы.

Работа 2.3.3. Влияние температуры перегрева и состава сплава на жидкотекучесть

Цель работы. Приобретение практических навыков в определении жидкотекучести и исследование влияния температуры перегрева и состава сплава на жидкотекучесть.

Оборудование, инструмент, материалы: печь для выплавки алюминиевых сплавов, весы технические с разновесами, потенциометр для измерения и записи термоЭДС, термопара хромель-алюмелевая, комплект модельно-опочной оснастки для получения спиральной пробы, графитошамотные тигли, формовочный инструмент, плавильный инструмент и приспособления для разлива металла, штангенциркуль, линейка.

Порядок проведения работы.

1. Рассчитать шихту для получения сплава (составы сплавов задаются преподавателем разные для каждой бригады).

2. По диаграмме состояния алюминий-кремний или алюминий-медь определить температуру ликвидуса сплава.

3. Взвесить шихтовые материалы и приготовить расплав заданного состава.

4. Перегреть расплав на 30, 80, 130 °С выше температуры ликвидуса.

5. Изготовить три формы для получения спиральной пробы для каждой температуры перегрева.

6. Залить расплав в формы при заданных температурах перегрева.

7. Выдержать залитые формы 10 минут, извлечь пробы и охладить их на воздухе.

8. Замерить длину спиралей по выступам с точностью до 10 мм. При различии длин спиралей более чем на 15 % опыт необходимо повторить.

Результаты наблюдений и их обработка. Полученные результаты для каждого занести в отдельную таблицу (табл. 2.9). Статистически обработать результаты измерения жидкотекучести. Вычислить доверительный интервал при вероятности 0,95. Найти относительную погрешность определения жидкотекучести.

Таблица 2.9

Влияние температуры перегрева на жидкотекучесть

Состав сплава, %	Температура, °С			Жидкотекучесть, мм
	ликвидуса	перегрева над ликвидусом	заливаемого металла	
		30		
		80		
		130		

Результаты определения жидкотекучести различных сплавов обобщить и установить ее зависимость от положения сплава на диаграмме состояния. По экспериментальным данным построить графические зависимости жидкотекучести от температуры заливки и состава сплава.

Содержание отчета.

1. Краткое изложение теории.
2. Методика определения жидкотекучести.
3. Результаты работы в виде таблицы.
4. Графики.
5. Выводы.

3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМ РАСПЛАВОМ

3.1. Общие сведения

При определенных условиях расплавы могут рассматриваться как ньютоновские жидкости, для которых выполняется условие [3]

$$\tau = \eta \frac{dV}{dr}, \quad (3.1)$$

где τ – касательное напряжение, возникающее в жидкости, Па; $\frac{dV}{dr}$ – градиент скорости течения жидкости, 1/с; η – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

Ньютоновские жидкости – жидкости, подчиняющиеся закону внутреннего трения Ньютона, в соответствии с которым напряжения (τ) прямо пропорциональны скоростям деформации ($\frac{dV}{dr}$). Характер зависимости $\frac{dV}{dr} = f(\tau)$ для ньютоновской жидкости представлен на рис. 3.1.

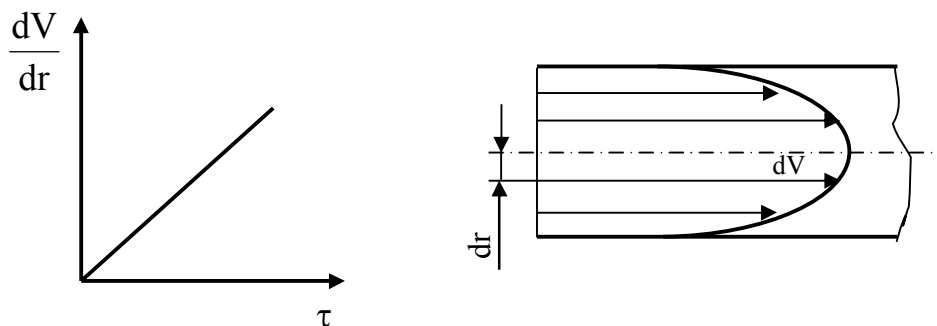


Рис. 3.1. Характер зависимости $\frac{dV}{dr} = f(\tau)$
для ньютоновской жидкости

При определенных допущениях течение расплава по каналам литейной формы подчиняется законам, установленным в классической гидравлике для ньютоновской жидкости в изотермических условиях [4].

3.1.1. Законы гидравлики для расчетов заполнения форм расплавом

При расчетах заполнения форм расплавом в литейной гидравлике используют базовые законы: сохранение энергии при течении жидкости по каналам (уравнение Бернулли), неразрывность потока (уравнение неразрывности), а также соответствующие коэффициенты сжатия струи, скорости, расхода и уравнения для определения скорости, объемного и массового расходов жидкости при сужении (расширении) каналов [3].

Схема к уравнению Бернулли представлена на рис. 3.2.

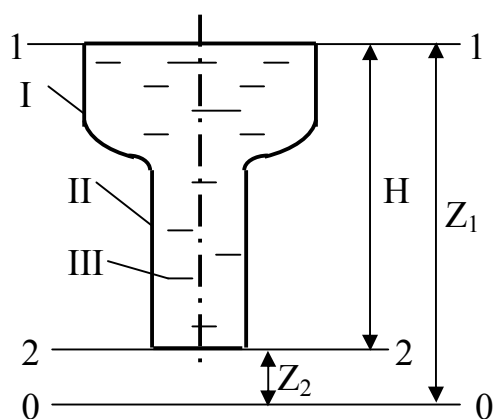


Рис. 3.2. Схема к уравнению Бернулли: I – воронка; II – стояк; III – расплав; 1-1 – верхнее сечение воронки; 2-2 – сечение стояка; 0-0 – линия сравнения

Закон сохранения энергии при течении жидкости по каналам: в каждом месте гидравлической системы сумма напоров (геометрический, кинетический, статический) есть величина постоянная, равная полному напору. Указанный закон описывается уравнением Бернулли [3, 4]:

$$H = Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta Z_{1-2} = \text{const}, \quad (3.2)$$

где H – полный напор, м; Z_1, Z_2 – геометрические напоры, соответственно в сечениях 1-1 и 2-2, м; $\frac{P_1}{\rho g}; \frac{P_2}{\rho g}$ – статические напоры, соответственно в

сечениях 1-1 и 2-2, м; $\frac{V_1^2}{2g}; \frac{V_2^2}{2g}$ – кинетические (скоростные) напоры, соот-

ветственно в сечениях 1-1 и 2-2, м; ΔZ_{1-2} – потери напора, вызванные местными гидравлическими сопротивлениями (трение о стенки каналов, резкое сужение или расширение каналов), м; P_1, P_2 – статические давления жидкости, соответственно в сечениях 1-1 и 2-2, Па; V_1, V_2 – скорости течения жидкости, соответственно в сечениях 1-1 и 2-2, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Потери напора в общем виде

$$\Delta Z_{1-2} = \xi \frac{V_1^2}{2g}, \quad (3.3)$$

где ξ – коэффициент местных гидравлических сопротивлений.

Схема к закону неразрывности потока приведена на рис. 3.3.

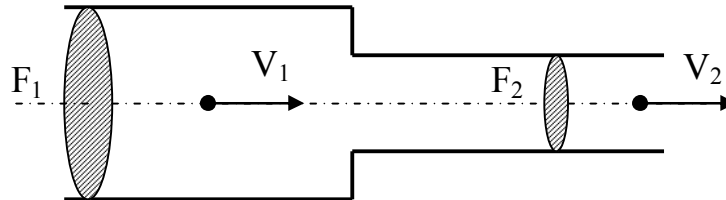


Рис. 3.3. Схема к закону неразрывности потока

Закон неразрывности потока: при установившемся движении жидкости в гидравлической системе ее расход во всех сечениях есть величина постоянная:

$$Q_V = F_1 V_1 = F_2 V_2 = \dots = F_n V_n = \text{const}, \quad (3.4)$$

где Q_V – объемный расход жидкости, м³/с; F_1, F_2, F_n – площади поперечного сечения потока соответственно в каналах 1, 2, n, м²; V_1, V_2, V_n – скорости течения жидкости соответственно по каналам 1, 2, n, м/с.

Массовый расход жидкости:

$$Q_M = \rho Q_V = \rho F_1 V_1 = \dots = \rho F_n V_n = \text{const}, \quad (3.5)$$

где Q_M – массовый расход жидкости, кг/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Схема к выводу уравнений для расчета скорости и расходов жидкости в сжатом сечении приведена на рис. 3.4.

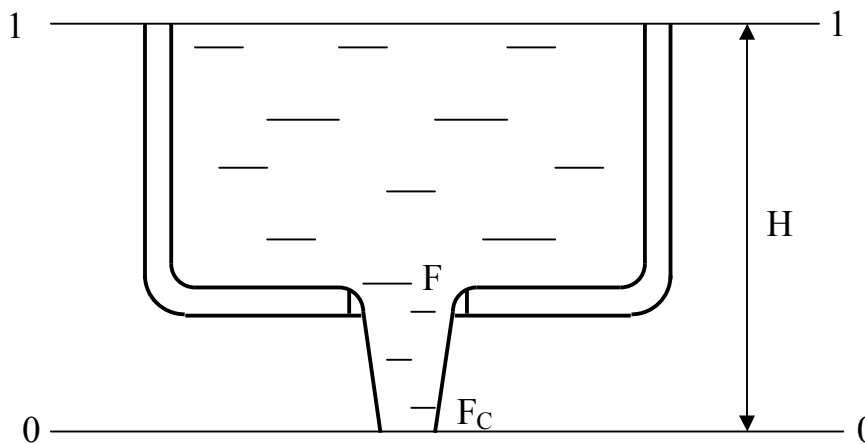


Рис. 3.4. Схема к выводу уравнений для расчета скорости и расходов течения жидкости в сжатом сечении

Пренебрегая давлением столба жидкости в воронке, уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 0-0 (сжатое сечение) в указанной схеме

$$H + \frac{P_{\text{АТМ}}}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = 0 + \frac{P_{\text{АТМ}}}{\rho g} + \frac{V_C^2}{2g} + \Delta Z_{1-0}, \quad (3.6)$$

где $P_{\text{АТМ}}$ – атмосферное давление, Па; V_C – скорость течения жидкости в сжатом сечении 0-0, м/с.

Для представленной на рис. 3.4 схемы потери напора при сужении потока жидкости

$$\Delta Z_{1-0} = \xi \frac{V_C^2}{2g}. \quad (3.7)$$

Примем

$$H + \frac{V_1^2}{2g} = H_0, \quad (3.8)$$

где H_0 – средний статический напор, м.

Тогда

$$H_0 = \frac{V_C^2}{2g} + \xi \frac{V_C^2}{2g} = \frac{V_C^2}{2g} (1 + \xi). \quad (3.9)$$

Отсюда

$$V_C = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}} \cdot \sqrt{2gH_0}. \quad (3.10)$$

Вводят коэффициент скорости

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi}}, \quad (3.11)$$

где φ – коэффициент скорости, учитывающий местные сопротивления.

Таким образом, скорость течения жидкости в сжатом сечении

$$V_C = \varphi \sqrt{2gH_0}, \quad (3.12)$$

где V_C – скорость течения жидкости в сжатом сечении, м/с; H_0 – средний статический напор, м; φ – коэффициент скорости.

Тогда объемный расход жидкости в сжатом сечении

$$Q_V = F_C V_C = F \varepsilon \varphi \sqrt{2gH_0}, \quad (3.13)$$

где F_C – площадь сжатого сечения потока жидкости, м²; ε – коэффициент заполнения сечения (коэффициент сжатия струи); F – площадь отверстия, м².

Для удобства расчетов вводим коэффициент расхода

$$\mu = \varepsilon \varphi. \quad (3.14)$$

Тогда объемный расход жидкости в сжатом сечении

$$Q_V = F\mu\sqrt{2gH_0}, \quad (3.15)$$

а массовый расход жидкости в сжатом сечении

$$Q_M = \rho F\mu\sqrt{2gH_0}. \quad (3.16)$$

Представленные уравнения классической гидравлики положены в основу расчетов и конструирования литниковых систем при разработке технологии изготовления отливок.

3.1.2. Основы конструирования и расчета литниковых систем

Литниковая система – совокупность каналов в форме, через которые расплав из ковша поступает в ее полость.

Простейшая литниковая система представлена на рис. 3.5.

Состав простейшей литниковой системы:

- воронка или литейная чаша – приемный резервуар расплава;
- стояк – вертикальный канал, по которому расплав опускается от уровня чаши до шлакоуловителя;
- шлакоуловитель – канал, соединяющий стояк и питатели и служащий для улавливания частиц шлака, формовочной смеси и других неметаллических включений, попавших в расплав;
- питатели – каналы, непосредственно подводящие расплав к полости формы.

Назначение литниковой системы:

- заполнение форм за оптимальное время;
- надежное улавливание шлака и неметаллических включений;
- плавное поступление расплава в полость формы без разбрызгивания и размыва ее стенок и стержней;
- направленное затвердевание металла;
- минимальные напряжения в отливках;
- минимально возможный расход металла на литниковую систему из экономических соображений (3...10 % от массы расплава, идущего на отливку).

Литниковые системы классифицируют по способу подвода металла в полость формы на верхние, нижние (сифонные), боковые, ярусные, комбинированные, дроссельные (вертикально-щелевые и горизонтально-дроссельные) [2, 8, 9, 10].

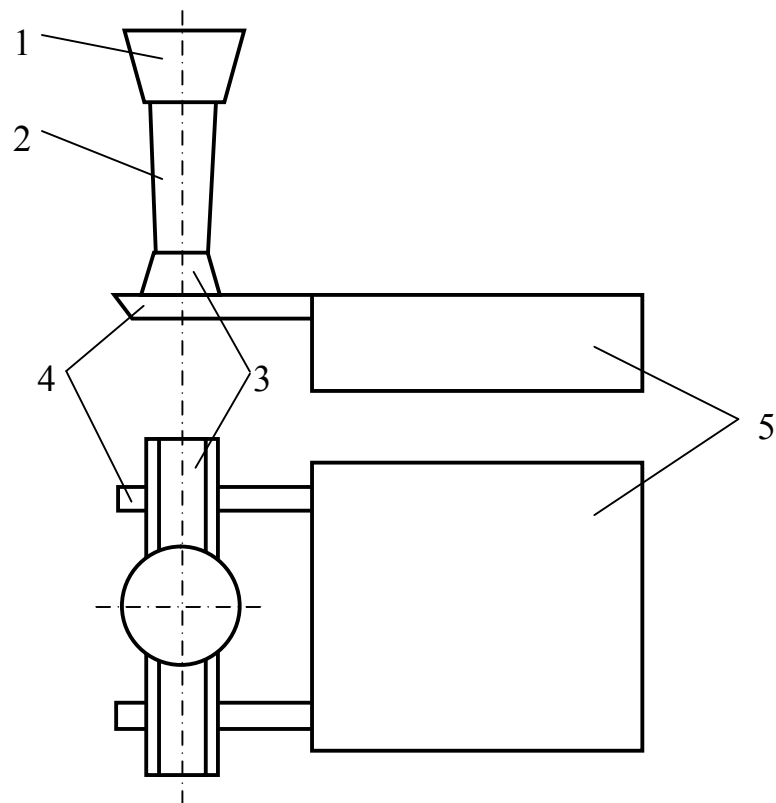


Рис. 3.5. Простейшая литниковая система:
 1 – воронка; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель;
 4 – питатели; 5 – отливка

По характеру изменения сечений элементов различают следующие виды: замкнутые (сужающиеся, заполненные) и незамкнутые (расширяющиеся, незаполненные) литниковые системы. Для замкнутых литниковых систем соблюдается условие

$$F_C > \Sigma F_{\text{шл}} > \Sigma F_{\text{п}}, \quad (3.17)$$

где F_C – площадь поперечного сечения стояка, м^2 ; $\Sigma F_{\text{шл}}$ – суммарная площадь поперечного сечения всех шлакоуловителей на одну отливку, м^2 ; $\Sigma F_{\text{п}}$ – суммарная площадь поперечного сечения всех питателей на одну отливку, м^2 .

Незамкнутые литниковые системы удовлетворяют неравенству

$$F_C < \Sigma F_{\text{шл}} < \Sigma F_{\text{п}}. \quad (3.18)$$

По роду материала, из которого получены каналы, различают литниковые системы в стержнях, из керамических трубок, из формовочной смеси.

Методики расчета литниковых систем основаны на определении оптимальной продолжительности заливки форм расплавом и площади самого узкого сечения литниковой системы, обеспечивающей это требуемое время заполнения форм металлом.

Для оптимальной продолжительности заливки форм должно соблюдаться неравенство

$$\tau_{\min} < \tau_{\text{опт}} < \tau_{\max}, \quad (3.19)$$

где $\tau_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки форм, с; τ_{\min} – минимально допустимая продолжительность заливки форм, с; τ_{\max} – максимально допустимая продолжительность заливки форм, с.

Минимально допустимая продолжительность заливки форм (τ_{\min}) определяется:

- временем, необходимым для удаления воздуха и газов из полости формы при ее заполнении расплавом;
- возможностью размыва поверхности формы расплавом;
- нежелательностью увеличения сечений каналов литниковой системы по экономическим соображениям.

Максимально допустимая продолжительность заливки форм расплавом (τ_{\max}) определяется:

- отводом тепла от расплава в форму и снижением температуры металла, предупреждением брака отливок по недоливам;
- требуемой жидкотекучестью расплава;
- необходимостью обеспечить скорость подъема расплава в форме, исключая образование ужимин и спаев в отливке.

Аналитически выведенные уравнения для расчета τ_{\max} и τ_{\min} недостаточно хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

Поэтому на практике применяют эмпирическую формулу для расчета оптимальной продолжительности заливки форм (уравнение Дубицкого Г.М.):

$$\tau_{\text{опт}} = S_1 \sqrt[3]{\delta G}, \quad (3.20)$$

где $\tau_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки формы, с; δ – преобладающая толщина стенки отливки, мм; G – масса расплава, приходящегося на одну отливку в форме с учетом прибылей и литников, кг; S_1 – коэффициент продолжительности заливки, зависящий от рода сплава, температуры заливки, места подвода металла.

Значения коэффициента продолжительности заливки форм для чугунового литья принимаются $S_1 = 2$, а при производстве отливок из алюминиевых и медных сплавов $S_1 = 2,4$ и $S_1 = 2,1$ соответственно. Значения S_1 для стальных отливок приведены в табл. 3.1.

Для отливок, заливаемых горизонтально, значения S_1 принимаются меньше на 0,1...0,2, так как вследствие растекания металла по холодной стенке формы увеличиваются тепловые потери.

Для отливок, склонных к образованию внутренних напряжений, холодных трещин и усадочных раковин (при подводе сверху) значение следует увеличить на 0,1...0,2.

Отливки, изготавливаемые в металлические формы, нужно заливать быстрее и S_1 следует уменьшить на 0,1...0,2.

Таблица 3.1

Значения коэффициента S_1 для стальных отливок [3]

Температура сплава	Подвод металла		
	снизу	по половине высоты	сверху
Нормальная	1,3	1,4	1,5...1,6
Повышенная	1,4...1,5	1,5...1,6	1,6...1,8

Преобладающая толщина стенки отливки (δ) – такая толщина стенки отливки, которая имеет наибольшую длину или максимально удалена от питателей. Масса расплава, приходящегося на одну отливку:

$$G = \frac{\sum G}{n}, \quad (3.21)$$

где G – масса расплава, приходящегося на одну отливку в форме, кг; n – число отливок в форме, шт.; $\sum G$ – общая масса заливаемого в форму расплава, кг.

Параметр G может быть определен по формуле

$$G = G_{\text{ЧЕРН}} + G_{\text{ПРИБ}} + G_{\text{Л.С}}, \quad (3.22)$$

где $G_{\text{ЧЕРН}}$ – черновая масса отливки, равная сумме масс детали и припусков на механическую обработку, кг; $G_{\text{ПРИБ}}$ – масса прибылей на одну отливку, кг; $G_{\text{Л.С}}$ – масса литниковой системы, кг.

Принимается $G_{\text{Л.С}}$, равной 3...10 % от $(G_{\text{ЧЕРН}} + G_{\text{ПРИБ}})$. При этом большая величина выбирается для мелких отливок.

Вывод уравнения для расчета площади самого узкого сечения литниковой системы, обеспечивающей $\tau_{\text{ОПТ}}$, осуществляется, исходя из формулы (3.16) классической гидравлики для определения массового расхода жидкости через каналы гидравлической системы при условии

$$Q_M = \frac{G}{\tau_{\text{ОПТ}}}, \quad (3.23)$$

где G – масса расплава, приходящегося на одну отливку в форме, кг; $\tau_{\text{ОПТ}}$ – оптимальная продолжительность заливки формы расплавом, с.

С учетом (3.16) и (3.23)

$$\frac{G}{\tau_{\text{опт}}} = \rho F_{\text{уз}} \mu_{\text{ф}} \sqrt{2gH_0}. \quad (3.24)$$

Тогда

$$F_{\text{уз}} = \frac{G}{\tau_{\text{опт}} \rho \mu_{\text{ф}} \sqrt{2gH_0}}, \quad (3.25)$$

где $F_{\text{уз}}$ – площадь самого узкого сечения литниковой системы, обеспечивающая $\tau_{\text{опт}}$, м²; G – масса расплава, приходящегося на одну отливку в форме, кг; $\tau_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки форм расплавом, с; ρ – плотность расплава, кг/м³; $\mu_{\text{ф}}$ – коэффициент расхода расплава в форме; g – ускорение силы тяжести, м/с²; H_0 – средний статический напор расплава в форме, м.

Значения коэффициента расхода $\mu_{\text{ф}}$ для отливок из разных сплавов приведены в табл. 3.2 и 3.3.

Средний статический напор расплава в форме (H_0 , м) определяется по формуле

$$H_0 = H - \frac{P^2}{2C}, \quad (3.26)$$

где H – напор расплава от воронки до питателей, м; P – высота отливки над питателями, м; C – высота отливки по положению в форме, м.

Таблица 3.2

Значения коэффициента $\mu_{\text{ф}}$ для чугунных и стальных отливок [3]

Сплав	Способ заливки	Сопротивление формы		
		большое	среднее	малое
Чугун	В сырую форму	0,35	0,42	0,50
	В сухую форму	0,41	0,48	0,70
Сталь	В сырую форму	0,25	0,32	0,42
	В сухую форму	0,20	0,38	0,50

Таблица 3.3

Значения коэффициента $\mu_{\text{ф}}$ для отливок из цветных сплавов [3, 8]

Сплавы	Сопротивление формы при расположения узкого места	
	в стояке	в питателе или шлакоуловителе
Алюминиевые	0,65...0,75	0,50...0,55
Магниевые	0,70...0,80	0,50...0,55
Медные	0,35...0,40	0,30...0,35

Средний статический напор расплава в форме (H_0 , м) определяется по формуле

$$H_0 = H - \frac{P^2}{2C}, \quad (3.26)$$

где H – напор расплава от воронки до питателей, м; P – высота отливки над питателями, м; C – высота отливки по положению в форме, м.

Схема к расчету среднего статического напора расплава в форме (H_0) представлена на рис. 3.6.

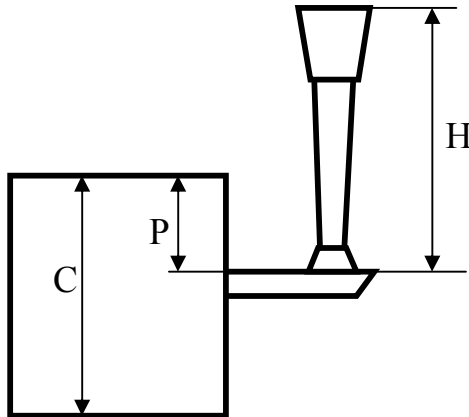


Рис. 3.6. Схема к расчету среднего статического напора расплава в форме

Методики расчета литниковых систем отличаются в зависимости от типа применяемых для заливки форм ковшей. Различают поворотные и стопорные типы ковшей.

3.1.3. Методика расчета литниковых систем при заливке форм расплавом из поворотных ковшей

Расчет литниковой системы при заливке из поворотного ковша производится в следующей последовательности [2, 3]:

- определение оптимальной продолжительности заливки форм по формуле (3.20);
- проверка средней скорости подъема уровня расплава в форме;
- расчет площади самого узкого сечения литниковой системы, обеспечивающей $\tau_{\text{опт}}$, по уравнению (3.25);
- определение площади сечений и размеров остальных элементов литниковой системы, исходя из принятых соотношений.

Проверка средней скорости подъема уровня расплава в форме осуществляется из условия, при котором отсутствуют недоливы и спаи в отливке:

$$V_{\text{CP}} = \frac{C}{\tau_{\text{опт}}} \geq V_{\text{доп}}, \quad (3.27)$$

где $V_{\text{ср}}$ – средняя скорость уровня подъема расплава в форме, мм/с; C – высота отливки по положению в форме, мм; $\tau_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки форм, с; $V_{\text{доп}}$ – допустимая скорость подъема расплава в форме, мм/с.

Значения допустимой скорости подъема расплава в форме ($V_{\text{доп}}$) при ее заливке чугуном и сталью приведены соответственно в табл. 3.4. и 3.5.

Таблица 3.4

Значение $V_{\text{доп}}$ для заливки форм чугуном [2, 3]

Толщина стенки δ , мм	$V_{\text{доп}}$, мм/с
Более 40	10...8
10...40	20...10
4...10	30...20
1,5...4,0	100...30

Для медных сплавов значения $V_{\text{доп}}$ соответствуют условиям заливки форм чугуном. Для алюминиевых и магниевых сплавов эту величину можно определить как $V_{\text{доп}} = (30...42) / \delta$, мм/с [3].

Таблица 3.5

Значение $V_{\text{доп}}$ для заливки форм сталью [2, 3]

Толщина стенки δ , мм	$V_{\text{доп}}$, мм/с
7...10	20
10...40	20...10
Более 40	7...10

При расчете литниковых систем для плоских отливок значения $V_{\text{ср}}$ чаще всего меньше $V_{\text{доп}}$. В этом случае при решении задач задаются $V_{\text{доп}}$ и вычисляют $\tau_{\text{опт}}$ при известной высоте отливки по положению в форме (C), используя выражение (3.27).

При разработке технологии изготовления отливки также может быть изменено ее положение в форме и осуществлена повторная проверка средней скорости подъема уровня расплава в форме. Соотношения между сечениями элементов литниковой системы приведены в табл. 3.6.

Элементы литниковой системы конструируются, исходя из следующих рекомендаций.

Стояки, в большинстве случаев конической формы, располагают вертикально. Стояки выполняются сужающимися книзу, когда не закрепляются на модельных плитах, или расширяющимися – закрепляющимися на модельных плитах. Конусность стояков при использовании металлических

моделей составляет примерно $1,0...1,5^\circ$ при высоте до 300 мм и около $0^\circ40'$ – при больших высотах.

Шлакоуловители и питатели в сечении бывают чаще всего трапециевидной формы. Основные размеры питателей трапециевидной формы приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.6

Соотношения между сечениями литниковой системы [2, 3, 8]

Характеристика отливки	Рекомендуемые соотношения $\Sigma F_{\Pi} : \Sigma F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}}$	Характеристика литниковой системы
Мелкие и средние отливки из чугуна	1:1,1:1,2	Сужающаяся
Крупные отливки из серого чугуна	1:1,2:1,4	Сужающаяся
Мелкие стальные отливки	1:1,1:1,2	Сужающаяся
Средние и крупные стальные отливки	(1,0...1,5):1:1	Расширяющаяся
Отливки из алюминиевых и медных сплавов	3:2:2	Расширяющаяся
Отливки из медных сплавов	1:(1,5...1,7):(0,75...1,0)	Комбинированная

Таблица 3.7

Основные размеры питателей [2, 3]

Тип питателя	Величина большего основания трапеции	Величина меньшего основания трапеции	Высота
Плоский	a	(0,7...0,9)·a	(0,1...0,5)·a
Нормальный	a	(0,7...0,8)·a	(0,8...1,3)·a
Высокий	a	(0,65...0,75)·a	(1,5...2,0)·a

3.1.4. Методики расчета литниковых систем при заливке форм расплавом из стопорных ковшей

Различают два способа заливки форм из стопорного ковша:

- без торможения струи;
- с торможением струи расплава стопором.

В зависимости от этого используют соответствующие две методики. Расчет литниковой системы при заливке из стопорного ковша без торможения струи производится в следующей последовательности:

- определение по формуле (3.20) оптимальной продолжительности заливки форм ($\tau_{\text{опт}}$);
- расчет средней скорости подъема уровня расплава в форме и проверка неравенства (3.27);
- выбор вида литниковой системы, полагая, что, как правило, при заливке из стопорного ковша отливок массой более 1000 кг применяют расширяющиеся системы с самым узким сечением – стояком;
- расчет параметров стопорного ковша, обеспечивающих оптимальную продолжительность заливки форм ($\tau_{\text{опт}}$);
- расчет площади самого узкого сечения литниковой системы;
- определение площадей сечений и размеров остальных элементов литниковой системы.

Схема к расчету литниковой системы при заливке формы из стопорного ковша представлена на рис. 3.7.

Расчет параметров стопорного ковша, обеспечивающих $\tau_{\text{опт}}$, представляет типично гидравлическую задачу по определению диаметра отверстий, высоты уровня расплава в ковше в начале и конце заливки, необходимых для достижения требуемого времени истечения заданной массы жидкости. Пренебрегая конусностью ковша и его высотой над формой, решение этой задачи описывается системой уравнений [3]

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_M^K = \frac{G}{\tau_{\text{опт}}} = \rho \mu_K \beta_P F_{\text{отв}}^K \sqrt{2gH_{\text{ср}}^K}, \end{array} \right. \quad (3.28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sqrt{H_{\text{ср}}^K} = \frac{\sqrt{H_1'} + \sqrt{H_1''}}{2}, \end{array} \right. \quad (3.29)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V = \frac{G}{\rho} = \frac{\pi D_K^2}{4} (H_1' - H_1''), \end{array} \right. \quad (3.30)$$

где $F_{\text{отв}}^K$ – суммарная площадь отверстий в стопорном ковше, м^2 ; H_1' – начальный уровень расплава в ковше, м; H_1'' – конечный уровень расплава в ковше, м; $H_{\text{ср}}^K$ – средний металлостатический напор в ковше, м; D_K – диаметр ковша, м; Q_M^K – массовый расход расплава при истечении из ковша, кг/с; G – масса расплава, приходящегося на одну отливку в форме, кг; $\tau_{\text{опт}}$ – оптимальная продолжительность заливки формы для одной отливки, с; ρ – плотность расплава, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; V – объем расплава, приходящегося на одну отливку в форме, м^3 ; μ_K – коэффициент расхода при истечении расплава из ковша, $\mu_K = 0,8 \dots 0,9$; β_P – коэффициент размыва стаканчика, $\beta_P = 1 \dots 1,25$.

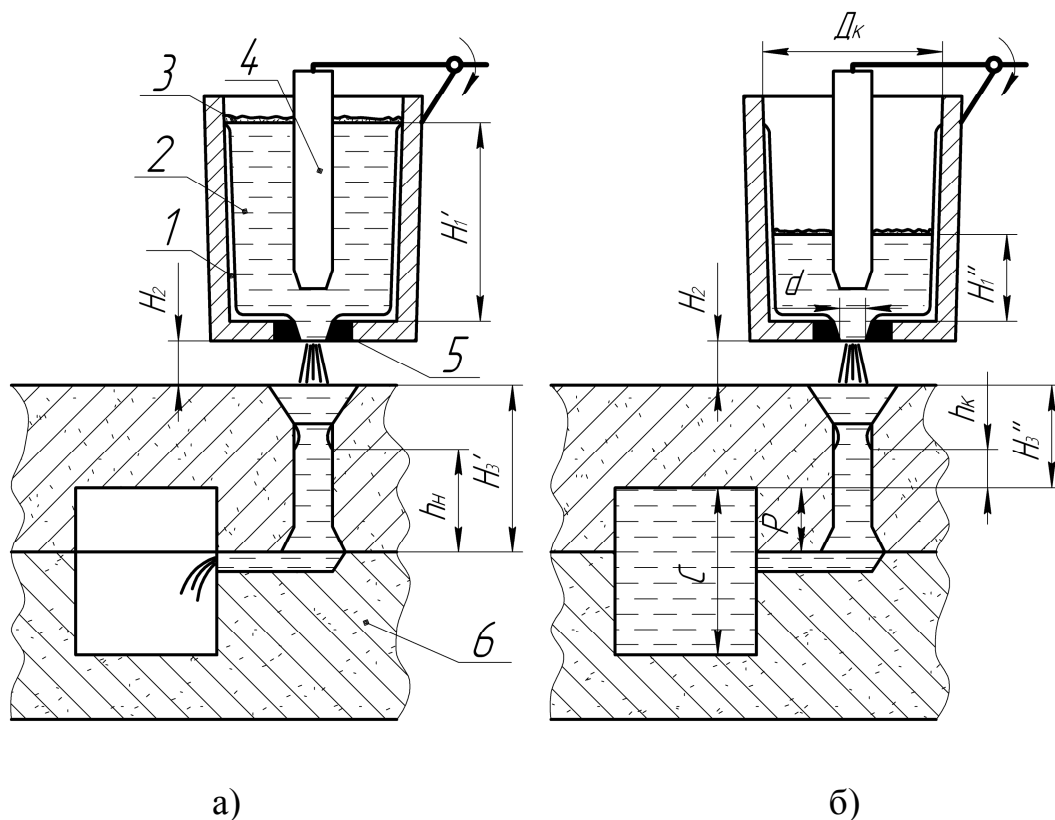


Рис. 3.7. Схема к расчету литниковой системы при заливке формы из стопорного ковша: 1 – стопорный ковш; 2 – расплав; 3 – шлак; 4 – стопорное устройство; 5 – стаканчик; 6 – форма; а – начало заливки; б – конец заливки

В представленной системе из трех уравнений четыре неизвестных: $F_{\text{ОТВ}}^K$, H_1' , H_1'' , $H_{\text{СР}}^K$. Чтобы система уравнений имела решение, необходимо задаться одним из неизвестных параметров. На практике используют два варианта. Согласно первому, задаваясь начальным уровнем расплава в ковше (H_1'), рассчитывается конечный уровень расплава в ковше (H_1'') из уравнения (3.30). Затем по уравнению (3.29) определяется средний металлостатический напор в ковше ($H_{\text{СР}}^K$) и из формулы (3.28) рассчитывается суммарная площадь отверстий в стопорном ковше ($F_{\text{ОТВ}}^K$), обеспечивающая оптимальную продолжительность заливки формы.

Зная $F_{\text{ОТВ}}^K$, определяются с количеством стаканчиков в стопорном ковше и диаметром их отверстий, используя формулы

$$F_{\text{ОТВ}_1}^K = \frac{F_{\text{ОТВ}}^K}{n}, \quad (3.31)$$

$$F_{\text{ОТВ}_1}^{\text{К}} = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (3.32)$$

где $F_{\text{ОТВ}_1}^{\text{К}}$ – площадь сечения одного отверстия стаканчика в ковше, м^2 ; n – число стаканчиков в ковше, шт.; d – диаметр отверстия одного стаканчика в ковше, м.

Таким образом, в соответствии с первым вариантом, задавшись уровнем расплава в ковше в начале заливки (H_1'), определяется диаметр отверстий стаканчиков, обеспечивающий оптимальную продолжительность заливки формы.

При втором варианте задаются диаметром отверстия стаканчика, выбирая стандартные значения 25...90 мм с шагом 5 мм. Затем рассчитываются $F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}}$ и $H_{\text{СР}}^{\text{К}}$ из уравнения (3.28). Наконец, решая совместно уравнения (3.29) и (3.30) системы относительно H_1' , определяется начальный уровень расплава в ковше, обеспечивающий оптимальную продолжительность заливки формы.

Расчет площади самого узкого сечения литниковой системы ведется из положения, что стояк должен пропустить в единицу времени столько расплава, сколько его проходит через отверстия стаканчиков в стопорном ковше.

Тогда справедливы равенства

$$Q_{\text{К}} = Q_{\text{Ф}}, \quad (3.33)$$

$$Q_{\text{К}} = \rho \mu_{\text{К}} \beta_{\text{Р}} F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}} \sqrt{2gH_{\text{СР}}^{\text{К}}}, \quad (3.34)$$

$$Q_{\text{Ф}} = \rho \mu_{\text{Ф}} F_{\text{УЗ}}^{\text{Ф}} \sqrt{2gh_{\text{СР}}^{\text{Ф}}}. \quad (3.35)$$

Из уравнений (3.33)...(3.35) площадь самого узкого сечения литниковой системы выражается формулой

$$F_{\text{УЗ}}^{\text{Ф}} = F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}} \frac{\mu_{\text{К}}}{\mu_{\text{Ф}}} \beta_{\text{Р}} \sqrt{\frac{H_{\text{СР}}^{\text{К}}}{h_{\text{СР}}^{\text{Ф}}}}, \quad (3.36)$$

где $F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}}$ – суммарная площадь сечения отверстий стаканчиков в стопорном ковше, м^2 ; $\mu_{\text{К}}$ – коэффициент расхода расплава при истечении из ковша, $\mu_{\text{К}} = 0,8...0,9$; $\mu_{\text{Ф}}$ – коэффициент расхода расплава в форме (см. табл. 3.2 и 3.3); $\beta_{\text{Р}}$ – коэффициент размыва стаканчика; $H_{\text{СР}}^{\text{К}}$ – средний металлостатический напор расплава в ковше, м; $h_{\text{СР}}^{\text{Ф}}$ – средний металлостатический напор расплава в форме, м.

На практике рассчитывается площадь самого узкого сечения литниковой системы для условий начала и конца заливки расплава в форму. Для начала заливки должны соблюдаться равенства

$$F_{\text{УЗ}}^{\Phi'} = F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}} \frac{\mu_{\text{К}}}{\mu_{\text{Ф}}} \beta_{\text{Р}}' \sqrt{\frac{H_1'}{h_{\text{Н}}}}, \quad (3.37)$$

$$h_{\text{Н}} = H_3' - (0,05 \dots 0,1), \quad (3.38)$$

$$\beta_{\text{Р}}' = 1, \quad (3.39)$$

где $\beta_{\text{Р}}'$ – коэффициент размыва стаканчика в начале заливки; H_1' – начальный уровень расплава в ковше, м; $h_{\text{Н}}$ – металлостатический напор расплава в форме в начале заливки, м; H_3' – высота формы над уровнем питателей, м.

Для конца заливки справедливы выражения

$$F_{\text{УЗ}}^{\Phi''} = F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}} \frac{\mu_{\text{К}}}{\mu_{\text{Ф}}} \beta_{\text{Р}}'' \sqrt{\frac{H_1''}{h_{\text{К}}}}, \quad (3.40)$$

$$h_{\text{К}} = H_3'' - (0,05 \dots 0,1), \quad (3.41)$$

$$\beta_{\text{Р}}'' > 1, \quad (3.42)$$

где $\beta_{\text{Р}}''$ – коэффициент размыва стаканчика в конце заливки; H_1'' – уровень расплава в ковше в конце заливки, м; $h_{\text{К}}$ – металлостатический напор расплава в форме в конце заливки, м; H_3'' – высота формы над верхним уровнем отливки, м.

Из двух значений $F_{\text{УЗ}}^{\Phi'}$ и $F_{\text{УЗ}}^{\Phi''}$ выбирается наибольшее и определяются площади сечений остальных элементов литниковой системы из соответствующих соотношений, представленных в табл. 3.6.

Расчет литниковых систем при заливке форм из стопорного ковша с торможением струи аналогичен приведенному, но дополнительно вводится коэффициент торможения струи [3]:

$$\beta_{\text{Т}} = \frac{V_{\text{СВОБ}}}{V_{\text{Т}}}, \quad (3.43)$$

где $V_{\text{СВОБ}}$ – скорость течения расплава из ковша без торможения со стороны стопора, м/с; $V_{\text{Т}}$ – скорость течения расплава из ковша, уменьшенная в результате торможения струи из-за стопора, м/с; $\beta_{\text{Т}}$ – коэффициент торможения струи, $\beta = 1,0 \dots 1,5$.

В этом случае для начала заливки справедливы выражения

$$F_{\text{УЗ}}^{\Phi'} = F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}} \frac{\mu_{\text{К}}}{\mu_{\text{Ф}}} \cdot \frac{\beta_{\text{Р}}'}{\beta_{\text{Т}}'} \sqrt{\frac{H_1'}{h_{\text{Н}}}}, \quad (3.44)$$

$$\beta_{\text{Т}}' > 1, \quad (3.45)$$

где $\beta_{\text{Т}}'$ – коэффициент торможения струи в начале заливки.

Для конца заливки соблюдаются условия

$$F_{\text{УЗ}}^{\Phi //} = F_{\text{ОТВ}}^{\text{К}} \frac{\mu_{\text{К}}}{\mu_{\text{Ф}}} \cdot \frac{\beta_{\text{Р}} //}{\beta_{\text{Т}} //} \sqrt{\frac{H_1 //}{h_{\text{К}}}}, \quad (3.46)$$

$$\beta_{\text{Т}} // = 1, \quad (3.47)$$

где $\beta_{\text{Т}} //$ – коэффициент торможения струи в конце заливки.

Из значений $F_{\text{УЗ}}^{\Phi /}$ и $F_{\text{УЗ}}^{\Phi //}$ выбирается наибольшее и рассчитываются площади сечений остальных элементов литниковой системы, исходя из соотношений, представленных в табл. 3.6.

Для расчета литниковых систем на ЭВМ на кафедре «Литейное производство» разработаны программы «STEEL», «LITBIL», «INMOLD».

3.2. Варианты контрольных заданий

Задание 3.2.1. Расчет литниковой системы при заливке форм из поворотного ковша

В соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 3.8, рассчитать оптимальную продолжительность заливки формы, площади поперечного сечения и размеры элементов литниковой системы при заливке из поворотного ковша. Выполнить эскизы сечений элементов литниковой системы.

При расчетах принять:

- количество шлакоуловителей – 1;
- количество питателей – 2;
- тип питателя – нормальный;
- количество отливок в форме – 1;
- при определении S_1 из табл. 3.1 температура расплава нормальная;
- при выборе значений $\mu_{\text{Ф}}$ из табл. 3.2 и 3.3 сопротивление формы – среднее, а заливка производится в сырую форму.

Пример выполнения задания 3.2.1 (вариант «Пример»).

Расчет массы литниковой системы, приходящейся на одну отливку, в количестве 6 % от ($G_{\text{ОТЛ}} + G_{\text{ПРИБ}}$):

$$G_{\text{Л}} = (114 + 25) \cdot 0,06 = 8,34 \text{ кг.}$$

Расчет массы жидкого металла, приходящегося на отливку, по формуле (3.22):

$$G = 114 + 25 + 8,34 = 147,34 \text{ кг.}$$

Расчет оптимальной продолжительности заливки формы по формуле (3.20):

$$\tau_{\text{ОПТ}} = 1,4 \sqrt[3]{22 \cdot 147,34} = 20,7 \text{ с.}$$

Таблица 3.8

Варианты задания 3.2.1

№ варианта	Сплав	Масса отливки, кг	Масса прибыли, кг	Преобладающая толщина стенки отливки, δ , мм	Высота стойка, см	Высота верхней точки отливки над питателем, Р, см	Высота отливки по положению в форме, С, см
Пример	Сталь	114	25	22	24	18	28
3.1	Сталь	10	2	10	12	6	10
3.2	Сталь	20	4	12	14	0	12
3.3	Сталь	30	6	14	16	2	14
3.4	Сталь	40	8	16	18	4	16
3.5	Сталь	50	10	18	20	8	8
3.6	Чугун	60	–	15	18	5	7
3.7	Чугун	70	–	17	22	0	9
3.8	Чугун	80	–	18	24	4	11
3.9	Чугун	90	–	19	30	3	13
3.10	Чугун	100	–	20	40	8	15
3.11	Силумин	3	1	9	10	0	2
3.12	Силумин	5	2	11	20	2	5
3.13	Силумин	7	3	13	25	4	8
3.14	Силумин	18	5	15	30	7	17
3.15	Силумин	25	7	17	35	10	20
3.16	Бронза	110	15	22	40	8	12
3.17	Бронза	120	18	20	45	18	20
3.18	Бронза	130	20	25	50	20	30
3.19	Бронза	140	24	30	55	25	28
3.20	Бронза	150	30	35	60	30	30

Проверка средней скорости подъема уровня расплава в форме по (3.27):

$$V_{\text{CP}} = \frac{280}{20,7} = 13,5 \text{ мм/с}; \quad V_{\text{доп}} = 10 \text{ мм/с} \quad (\text{см. табл. 3.4}); \quad V_{\text{CP}} > V_{\text{доп}}$$

Расчет среднего статического напора расплава в форме по ур-ю (3.26):

$$H_0 = 0,24 - \frac{(0,18)^2}{2 \cdot 0,28} = 0,18 \text{ м.}$$

Расчет площади самого узкого сечения литниковой системы (питателя), обеспечивающей оптимальную продолжительность заливки формы, по формуле (3.25):

$$F_{\text{уз}} = \Sigma F_{\text{II}} = \frac{147,3}{20,7 \cdot 7200 \cdot 0,32 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 0,18}} = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{уз}} = 16,8 \text{ см}^2; \quad F_{\text{II}} = \frac{\Sigma F_{\text{II}}}{2}; \quad F_{\text{II}} = \frac{16,8}{2} = 8,4 \text{ см}^2.$$

Расчет площади сечений остальных элементов литниковой системы, обеспечивающих $\tau_{\text{онт}}$, исходя из соотношений табл. 3.6:

$$\Sigma F_{\text{II}} : \Sigma F_{\text{ШЛ}} : F_{\text{СТ}} = 1 : 1,1 : 1,2;$$

$$\Sigma F_{\text{ШЛ}} = F_{\text{ШЛ}} = 1,1 \cdot \Sigma F_{\text{II}};$$

$$\Sigma F_{\text{ШЛ}} = 1,1 \cdot 16,8 = 18,5 \text{ см}^2;$$

$$F_{\text{СТ}} = 1,2 \cdot \Sigma F_{\text{II}};$$

$$F_{\text{СТ}} = 1,2 \cdot 16,8 = 20,2 \text{ см}^2.$$

Сечения элементов литниковой системы при заливке из поворотного ковша представлены на рис. 3.8.

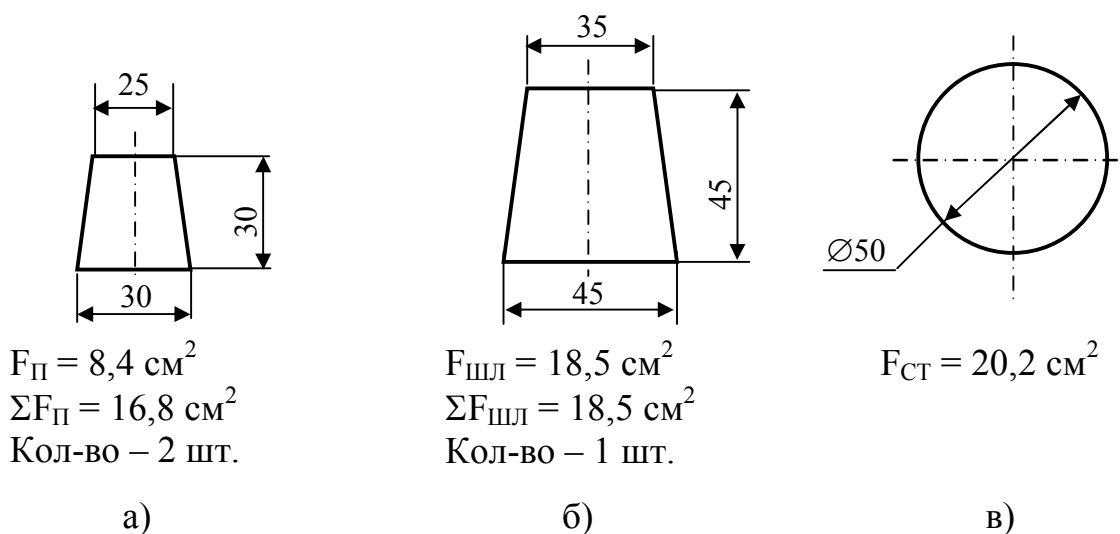


Рис. 3.8. Сечения элементов литниковой системы при заливке из поворотного ковша: а – питатель; б – шлакоуловитель; в – стояк

Задание 3.2.2. Расчет параметров стопорного ковша, обеспечивающих оптимальную продолжительность заливки формы

В соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 3.9, рассчитать оптимальную продолжительность заливки форм и обеспечивающие ее параметры стопорного ковша: уровень расплава в ковше в конце заливки, площадь и диаметр отверстия стаканчика.

При расчетах принять следующие значения величин:

- коэффициент размыва стаканчика – $\beta_p = 1,06$;
- масса литников – 3 % от массы отливки с прибылью;
- при выборе значения S_1 из табл. 3.1 температура – нормальная, подвод металла – снизу.

Пример выполнения задания 3.2.2 (вариант «Пример»).

Расчет массы литников, приходящейся на одну отливку в форме:

$$G_{\text{Л}} = (13400 + 4000) 0,03 = 522 \text{ кг.}$$

Расчет массы жидкого металла, приходящейся на одну отливку, по формуле (3.22):

$$G = 13400 + 4000 + 522 = 17922 \text{ кг.}$$

Расчет оптимальной продолжительности заливки формы по ф. (3.20):

$$\tau_{\text{опт}} = 1,3 \sqrt[3]{80 \cdot 17922} = 146 \text{ с.}$$

$$S_1 = 1,3 \text{ (см. табл. 3.1).}$$

Расчет уровня расплава в ковше в конце заливки, используя (3.30):

$$H_1'' = H_1' - \frac{4G}{\rho \pi D_K^2} = 1,9 - \frac{4 \cdot 17922}{7200 \cdot 3,14 \cdot (1,75)^2} = 0,83 \text{ м.}$$

Расчет среднего статического напора расплава в ковше по ф. (3.29):

$$\sqrt{H_{\text{CP}}^K} = \frac{\sqrt{1,9} + \sqrt{0,83}}{2} = 1,15 \text{ м}^{\frac{1}{2}};$$

$$H_{\text{CP}}^K = (1,15)^2 = 1,32 \text{ м.}$$

Расчет площади и диаметра отверстия стаканчика ковша, обеспечивающих оптимальную продолжительность заливки формы, из ур. (3.28):

$$F_{\text{ОТВ}}^K = \frac{17922}{0,8 \cdot 1,06 \cdot 7200 \cdot 146 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 1,32}} = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{ОТВ}}^K = 41 \text{ см}^2; \quad d = \sqrt{\frac{4 \cdot 41}{3,14}} = 7 \text{ см.}$$

Ответ: $H_1'' = 0,83 \text{ м}$; $H_{\text{CP}}^K = 1,32 \text{ м}$; $F_{\text{ОТВ}}^K = 41 \text{ см}^2$; $d = 7 \text{ см}$.

Таблица 3.9

Варианты задания 3.2.2

№ варианта	Сплав	Масса отливки, кг	Масса прибыли, кг	Преобладающая толщина стенки отливки, δ , мм	Диаметр ковша, м	Начальный уровень расплава в ковше, м
Пример	Сталь	13400	4000	80	1,75	1,9
3.21	Сталь	13000	3500	70	1,70	1,85
3.22	Сталь	12500	3000	60	1,60	1,75
3.23	Сталь	12000	2500	50	1,50	1,65
3.24	Сталь	11500	2000	45	1,40	1,55
3.25	Сталь	11000	1500	40	1,30	1,45
3.26	Сталь	10500	1000	35	1,20	1,55
3.27	Чугун	15000	–	75	1,70	1,80
3.28	Чугун	14500	–	70	1,65	1,70
3.29	Чугун	14000	–	65	1,55	1,60
3.30	Чугун	13500	–	60	1,45	1,50
3.31	Чугун	13000	–	55	1,35	1,40
3.32	Чугун	12500	–	50	1,25	1,30
3.33	Чугун	12000	–	45	1,15	1,20
3.34	Силумин	5000	1000	68	1,35	1,50
3.35	Силумин	4500	800	57	1,30	1,40
3.36	Силумин	4000	700	48	1,25	1,30
3.37	Силумин	3500	600	36	1,20	1,20
3.38	Силумин	3000	500	30	1,15	1,10
3.39	Силумин	2500	400	28	1,10	1,00
3.40	Силумин	2000	300	22	1,00	0,90

Задание 3.2.3. Расчет литниковой системы при заливке форм из стопорного ковша без торможения струи

В соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 3.10, рассчитать площади сечений и размеры элементов литниковой системы для изготовления отливок заливкой форм из стопорного ковша без торможения струи. Выполнить эскизы элементов литниковой системы.

При расчетах принять: $\mu_K = 0,8 \dots 0,9$; μ_Φ – по табл. 3.2 и 3.3 при условии заливки в сухую форму и ее среднем сопротивлении. $\beta_P' = 1$; $\beta_P'' = 1,12$. Тип питателя – нормальный. Количество питателей – 3. Количество шлакоуловителей – 1.

Оптимальная продолжительность заливки форм и обеспечивающие ее параметры стопорного ковша ($F_{\text{ОТВ}}^K$, H_1' , H_1'') рассчитаны при выполнении задания 3.2.2. и должны быть использованы при расчете литниковой системы.

Пример выполнения задания 3.2.3 (вариант «Пример»).

Расчет металлостатического напора расплава в форме в начале заливки по выражению (3.38):

$$h_H = 2,48 - 0,1 = 2,38 \text{ м.}$$

Расчет площади самого узкого сечения литниковой системы для условий начала заливки по формуле (3.37):

$$F_{\text{УЗ}}^{\Phi'} = \frac{0,8}{0,38} \cdot 1,0 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{1,90}{2,38}} = 8,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Расчет металлостатического напора расплава в форме в конце заливки по выражению (3.41):

$$h_K = 0,5 - 0,1 = 0,4 \text{ м.}$$

Расчет площади самого узкого сечения литниковой системы для условий конца заливки по формуле (3.40):

$$F_{\text{УЗ}}^{\Phi''} = \frac{0,8}{0,38} \cdot 1,12 \cdot 4,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{0,83}{0,4}} = 1,39 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2.$$

Выбор наибольшего значения из $F_{\text{УЗ}}^{\Phi'}$ и $F_{\text{УЗ}}^{\Phi''}$:

$$F_{\text{УЗ}}^{\Phi'} < F_{\text{УЗ}}^{\Phi''}; \quad F_{\text{УЗ}}^{\Phi''} = 1,39 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2; \quad F_{\text{УЗ}}^{\Phi''} = 139 \text{ см}^2.$$

Расчет площади сечений остальных элементов литниковой системы из соотношений, представленных в табл. 3.6.:

$$\Sigma F_{\text{П}} : \Sigma F_{\text{ШЛ}} : F_{\text{СТ}} = 1,5 : 1 : 1;$$

$$F_{\text{СТ}} = F_{\text{УЗ}}^{\Phi''} = 139 \text{ см}^2;$$

$$\Sigma F_{\text{П}} = 1,5 \cdot F_{\text{СТ}} = 1,5 \cdot 139 = 210 \text{ см}^2; \quad F_{\text{П}} = \frac{\Sigma F_{\text{П}}}{3} = \frac{210}{3} = 70 \text{ см}^2;$$

$$\Sigma F_{\text{ШЛ}} = F_{\text{СТ}} = 139 \text{ см}^2; \quad F_{\text{ШЛ}} = \Sigma F_{\text{ШЛ}} = 139 \text{ см}^2.$$

Варианты задания 3.2.3

№ варианта	Высота формы над уровнем питателей, H_3' , см	Высота формы над верхним уровнем отливки, H_3'' , см
Пример	248	50
3.41	230	90
3.42	220	80
3.43	210	70
3.44	200	60
3.45	190	40
3.46	180	55
3.47	170	95
3.48	160	85
3.49	150	75
3.50	140	65
3.51	130	55
3.52	120	53
3.53	110	51
3.54	175	88
3.55	165	86
3.56	155	84
3.57	145	82
3.58	135	76
3.59	125	74
3.60	115	68

Сечения элементов литниковой системы при заливке из стопорного ковша представлены на рис. 3.9.

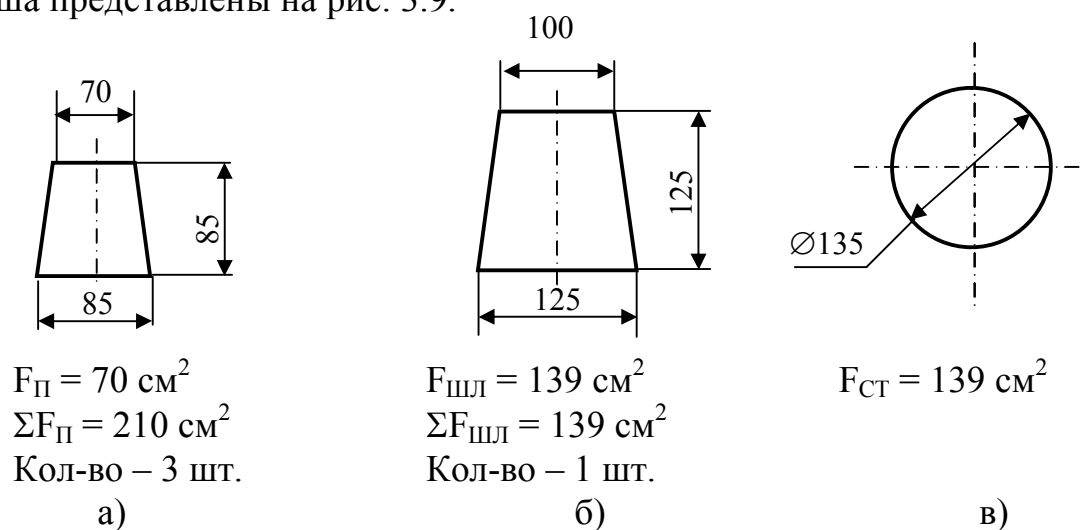


Рис. 3.9. Сечения элементов литниковой системы при заливке из стопорного ковша: а – питатель; б – шлакоуловитель; в – стояк

3.3. Лабораторные работы

Работа 3.3.1. Определение потерь напора литниковой системы

Цель работы. Изучить влияние на потери напора в литниковой системе ее длины и отношения сечений ее элементов.

Оборудование; инструмент, материалы: установка для определения гидравлических потерь литниковой системы (рис. 3.10), линейка, штангенциркуль, вода водопроводная, тушь для подкраски воды.

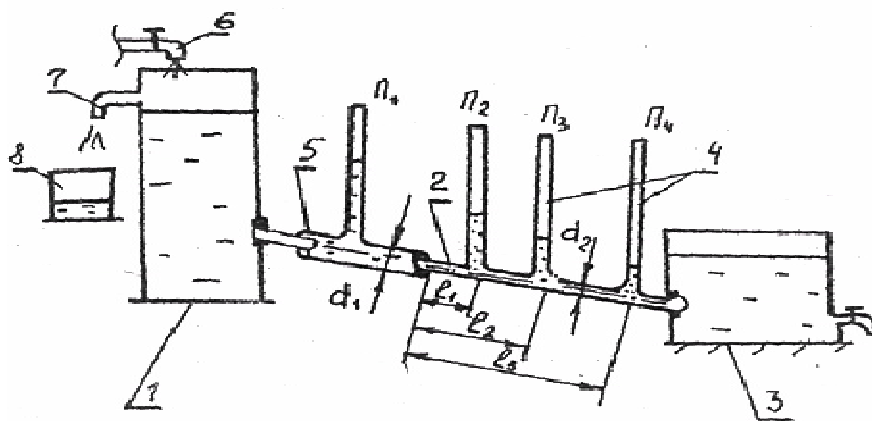


Рис. 3.10. Схема установки для определения гидравлических потерь литниковой системы:

- 1 – резервуар «стояк»; 2 – сменные трубки с варьируемым отношением сечений («шлакоулавнитель», «питатель»);
- 3 – резервуар «отливка»; 4 – пьезометры; 5 – прокладка;
- 6 – кран подачи воды; 7 – кран для установления постоянного напора в «стояке»; 8 – сливной бачок.

Порядок проведения эксперимента.

1. Составить таблицу условий эксперимента и полную матрицу планирования полного факторного эксперимента ПМП ПФЭ 2^2 (табл. 3.11).

Таблица 3.11

Уровень	Фактор	Условия эксперимента	
		Отношение сечений $W_{\text{шл}}/W_{\text{п}}$	Длина питателя l , см
		X_1	X_2
	Верхний (+)		
	Нижний (-)		
	Основной		
	Шаг варьирования		

2. В соответствии с ПМП ПФЭ 2^2 провести эксперимент:

2.1. Собрать установку (см. рис. 3.10), используя трубки 2 с заданным соотношением их сечений, предусмотренным ПМП ПФЭ;

2.2. Включить кран 6 и добиться установившегося движения воды в литниковой системе под постоянным напором в стояке;

2.3. Зафиксировать показания пьезометров при установившемся давлении подкрашенной воды;

2.4. Отключить кран 6 и слить воду из системы;

2.5. Повторить опыт не менее 3-х раз;

2.6. Заменить трубки 2 на имеющие другие отношения их сечений по ПМП ПФЭ и провести очередную серию опытов (см п. 2.2–2.6).

3. Результаты замеров представить в виде таблицы (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Результаты опытов

№ серии опытов	Уровень факторов		№ опыта в серии	Показания пьезометров	
	X_1	X_2		В шлакоулавителе $h_{шл}$, см	В питателе $h_{пит}$, см
1	+	+	1		
			2		
			3		
2	–	+	1		
			2		
			3		
3	+	–	1		
			2		
			3		
4	–	–	1		
			2		
			3		

Обработка опытных данных.

1. Рассчитать потери напора в питателе $\Delta h_i = h_{шлi} - h_{питi}$ и определить в соответствии с разделом 1 статистические параметры: среднеарифметическое значение Δh , среднеквадратическое отклонение S и доверительный интервал, представив результаты обработки данных в виде табл. 3.13.

Обработка результатов эксперимента

№ серии опытов	Уровень факторов		№ опыта в серии	Δh_i	$\overline{\Delta h_i}$	$\Delta h_i - \overline{\Delta h_i}$	$(\Delta h_i - \overline{\Delta h_i})^2$	S _i
	X ₁	X ₂						
1	+	+	1					
			2					
			3					
2	-	+	1					
			2					
			3					
3	-	-	1					
			2					
			3					
4	-	-	1					
			2					
			3					

2. Рассчитать коэффициенты регрессии, построив математическую модель $\Delta h = f(w_{\text{шл}}/w_{\text{пит}}; l)$ и проверить ее адекватность

3. Сделать выводы о влиянии на потери напора литниковой системы длины и отношения сечений ее элементов.

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Эскиз экспериментальной установки для определения потерь напора литниковой системы с указанием основных размеров.
3. Таблицы опытных данных и результатов их обработки.
4. Уравнение регрессии $\Delta h = f(w_{\text{шл}}/w_{\text{пит}}; l)$.
5. Выводы.

Работа 3.3.2. Исследование различных режимов заполнения форм металлом

Цель работы. Изучить влияние различных способов подвода металла в полость формы (сверху, сифоном) на зависимость высоты и скорости подъема от времени заливки на основе моделирования процессов заполнения емкости водой.

Оборудование, инструмент, материалы: установка для исследования высоты и скорости подъема жидкости в полости формы (рис 3.2), вода водопроводная, тушь красная для подкраски воды.

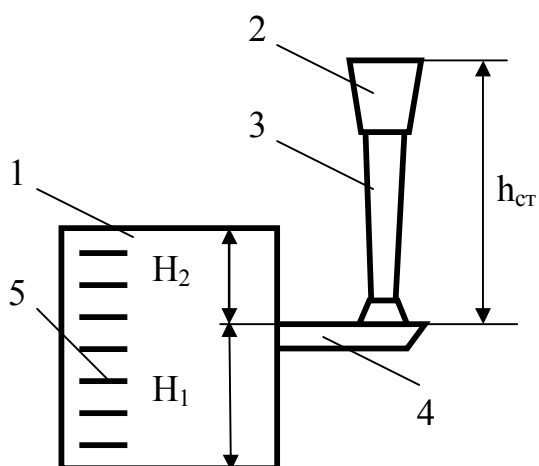


Рис. 3.11. схема установки для исследования скорости заливки формы при различных способах подвода металла: 1 – форма; 2 – чаша, 3 – стояк; 4 – питатель; 5 – метки.

Порядок проведения эксперимента.

1. Залить подкрашенную воду в чаше литниковой системы установки.
2. Секундомером фиксировать продолжительность подъема воды до соответствующих меток установки.
3. Результаты замеров заносить в табл. 3.14 опытных данных.
4. Повторить опыты согласно п. 1–3 не менее 3-х раз.

Таблица 3.14
Зависимость высоты подъема жидкости от времени ее заливки

Способ подвода жидкости	Номера меток	Высота подъема h_i , м	Время T_i , с

Обработка опытных данных.

1. Для периода заливки сверху составить табл. 3.15.

Таблица 3.15
Зависимость высоты подъема жидкости от времени ее заливки

Способ подвода жидкости	Номера меток	Высота подъема h_i , м	Время T_i , с

2. Для периода заливки сифоном данные представить в виде табл. 3.16.

Таблица 3.16
Зависимость скорости подъема жидкости от времени ее заливки сифоном

Номер опыта	$h_i - H_1$, м	$T_i - T_1$, с	$W_i = \frac{h_i - H_1}{T_i - T_1}$, м/с

3. Определить статистические параметры: среднеарифметические значения T , W , соответствующие дисперсии и доверительные интервалы, а так же уравнения регрессии: $h_i = f_1(T_i)$ и $W_i = f_2(T_i)$ для сифонной заливки.

4. Построить графики $h_i = f_1(T_i)$ и $W_i = f_2(T_i)$, нанести на них все опытные точки.

5. Сделать выводы о влиянии способа подвода металла в полость формы на зависимости $h=f_1(T)$ и $W=f_2(T)$.

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Описание способов заливки.
3. Эскиз экспериментальной установки основных размеров.
4. Таблицы опытных данных и результатов их обработки.
5. Графики, отражающие изменение высоты и скорости подъема жидкости в опытной установке в зависимости от времени заливки при различных способах заливки.
6. Выводы.

Работа 3.3.3. Оценка влияния фильтров на заполнение форм металлом

Цель работы. Изучить влияние параметров зернистых фильтров (диаметр частиц, высота) на скорость подъема металла в полости формы на основе моделирования процессов заполнения емкости водой.

Оборудование, инструмент, материалы: установка для исследования высоты и скорости подъема жидкости в полости формы (см. рис. 3.11), обойма фильтра (рис. 3.12), секундомер, линейка, штангенциркуль, зернистый материал фильтра: рассеянный по фракциям, вода водопроводная, тушь для подкраски воды.

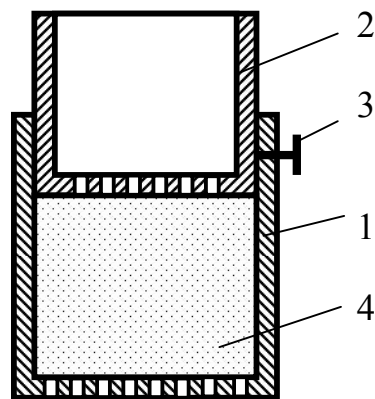


Рис. 3.12. Схема обоймы фильтра:
1 – внешний стакан; 2 – внутренний (подвижный) стакан; 3 – фиксатор;
4 – зернистый материал

Порядок проведения эксперимента.

1. Составить таблицу условий эксперимента и полную матрицу планирования полного факторного эксперимента (ПМП ПФЭ) 2^2

Таблица 3.17

Условия эксперимента

Уровень	Фактор	Диаметр частиц d, мм	Высота фильтра h, мм
		X ₁	X ₂
	Верхний (+)		
	Нижний (-)		
	Основной		
	Шаг варьирования		

2. В соответствии с ПМП ПФЭ провести эксперимент:

2.1. Засыпать зернистый материал фильтра определенной фракции d на соответствующую глубину h в обойму, плотно прижать подвижным стаканом, зафиксировав его болтом;

2.2. Установить обойму в питатель литниковой системы установки;

2.3. Заливать подкрашенную воду в чашу литниковой системы установки;

2.4. Секундомером фиксировать продолжительность подъема воды до соответствующих меток установки.

3. Результаты замеров представить в виде табл.3.18.

Таблица 3.18

Результаты опытов

№ опыта	Уровень факторов		Номера меток	Высота подъема, h _i , м	Время T _i , с
	X ₁	X ₂			
1	+	+	1		
			2		
			3		
			...		
2	-	+	1		
			2		
			3		
			...		
3	+	-	1		
			2		
			3		
			...		
4	-	-	1		
			2		
			3		
			...		

Обработка опытных данных.

1. Определить в соответствии с разделом 1 статистические параметры: среднеарифметическое значение W , среднеквадратическое отклонение S и доверительный интервал для величины скорости $W_i = h_i/T_i$, представив результаты обработки опытных данных в виде табл. 3.19. Сравнить значения W для случаев использования фильтра и без него (работа 3.3.2).

Таблица 3.19

Обработка результатов эксперимента

№ серии опытов	Уровень факторов		$W_i = h_i/T_i$	\bar{w}_i	$w_i - \bar{w}_i$	$(w_i - \bar{w}_i)^2$	S_i
	X_1	X_2					
1	+	+					
2	-	+					
3	+	-					
4	-	-					

2. Рассчитать коэффициенты регрессии, построить математическую модель $W=f(d;h)$ и проверить ее адекватность.

3. Сделать вывод о влиянии на скорость заполнения формы металлом установки фильтра, а также его параметров: диаметра частиц d и высоты h .

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Эскиз фильтра с указанием основных размеров.
3. Таблица опытных данных и результатов их обработки.
4. Уравнение регрессии $W=f(d;h)$.
5. Выводы.

Работа 3.3.4. Определение коэффициента сопротивления при заливке из стопорного ковша

Цель работы. Изучить закономерности истечения жидкости из стопорного ковша при заливке литейных форм и определить значения коэффициента сопротивления системы, а также влияние на него основных технологических параметров.

Оборудование, инструмент, материалы: экспериментальная установка – стопорный ковш (рис. 3.13), ковшечные стаканы различных диаметров d и соотношений h/d , секундомер, линейка, штангенциркуль, мерный бак, подставка, вода водопроводная.

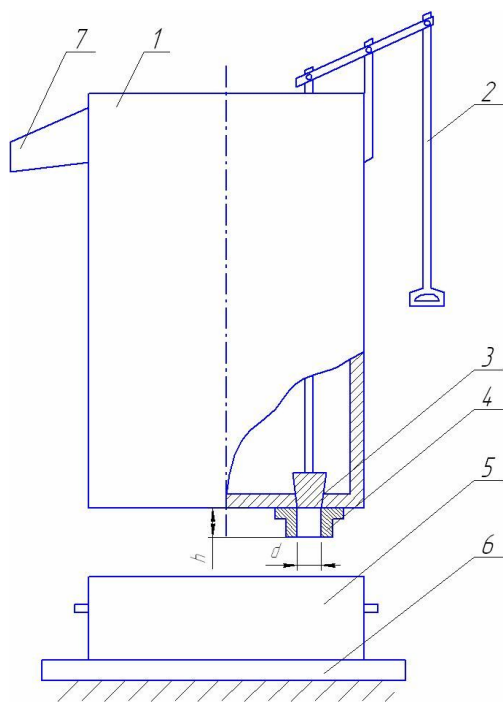


Рис. 3.13. Схема установки: 1 – бак; 2 – рычаг стопора; 3 – стопорная пробка; 4 – ковшечный стакан; 5 – мерный бак; 6 – подставка; 7 – слив

Порядок проведения эксперимента.

1. Составить таблицу условий эксперимента и полную матрицу планирования полного факторного эксперимента ПМП ПФЭ 2^2
2. В соответствии с (ПМП ПФЭ) 2^2 провести эксперимент:
 - 2.1. Собрать установку (рис. 3.13).
 - 2.2. Заполнить ковш водой на соответствующую высоту.
 - 2.3. Открыть стопор и одновременно включить секундомер.
 - 2.4. После заполнения мерного бака водой опустить стопор и одновременно остановить секундомер.
 - 2.5. Произвести соответствующие замеры и определить объем вытекшей жидкости.

Таблица 3.20

Условия эксперимента

Уровень \ Фактор	Диаметр стакана d, см	Отношение стакана h/d	Напор воды в ковше, Н, см
	X_1	X_2	X_3
Верхний (+)			
Нижний (-)			
Основной			
Шаг варьирования			

3. Занести в табл. 3.21 полученные опытные данные и рассчитать расход жидкости.

Обработка опытных данных.

1. Рассчитать значения коэффициентов сопротивления

$$\mu = \frac{q}{F\sqrt{2gH}}, \quad (3.48)$$

где q – расход жидкости (из эксперимента), см³/с; F – площадь сечения отверстия ковшевого стакана, см²; g – ускорение силы тяжести, см/с²; H – напор жидкости в ковше, см.

2. Определить статистические параметры: среднеарифметическое значение $\bar{\mu}$, среднеквадратическое отклонении S и доверительный интервал для величины μ .

3. Результаты расчетов представить в виде табл.3.22.

4. Рассчитать коэффициенты регрессии, построить математическую модель $\mu=f(d;h/d;H)$ и проверить ее адекватность.

5. Сделать выводы о влиянии параметров ковшевого стакана: диаметра отверстия d , соотношения h/d , а также величины напора жидкости в стопорном ковше H на значения коэффициента сопротивления μ системы.

Таблица 3.21

Опытные данные по определению расхода воды при истечении из стопорного ковша

№ серии опытов*	Уровень факторов			Объем воды в ковше Q_i , см ³	Время истечения T_i , с	Расход воды $q_i = \frac{Q_i}{T_i}$, см ³ /с
	Диаметр стакана, см	Отношение h/d стакана	Напор воды в ковше, H , см			
	X_1	X_2	X_3			
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

* В каждой серии опыты должны быть повторены не менее 3 раз.

Расчетная таблица коэффициентов сопротивления

№ серии опытов	Уровень факторов			$W_i = h_i/T_i$	$\bar{\mu}_i$	$\mu_i - \bar{\mu}_i$	$(\mu_i - \bar{\mu}_i)^2$	S _i
	X ₁	X ₂	X ₃					
1	+	+	+					
2	-	+	+					
3	+	-	+					
4	-	-	+					
5	+	+	-					
6	-	+	-					
7	+	-	-					
8	-	-	-					

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Эскиз стопорного ковша с указанием основных размеров.
3. Таблицы опытных данных и результатов их обработки.
4. Уравнение регрессии.
5. Выводы.

4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КОНТАКТЕ РАСПЛАВА С ФОРМОЙ

4.1. Общие сведения

При контакте с жидким металлом форма отводит тепло от расплава. При этом температура формы увеличивается, а температура металла уменьшается. Отвод тепла от расплава формой – нестационарный тепловой процесс (температура отдельных точек системы «отливка–форма» изменяется во времени) [3, 4].

При расчете нестационарного теплового процесса решаются задачи

$$t = f_1 (x; \tau), \quad (4.1)$$

$$Q = f_2 (x; \tau), \quad (4.2)$$

$$x = f_3 (\tau), \quad (4.3)$$

где t – температура, К; Q – количество теплоты, аккумулируемое формой, Дж; x – координата, м; τ – время, с.

В системе «металл–форма» происходят следующие тепловые процессы [3]:

- передача тепла через жидкий металл;
- теплопередача через твердый металл;
- передача тепла от расплава в форму;
- теплопередача от твердого металла в форму через воздушный зазор;
- переход тепла через форму;
- излучение тепла открытыми прибылями.

При этом имеют место все три вида теплопередачи: теплопроводность (основной вид), конвекция (для массивных отливок), излучение (для крупных отливок с прибылями).

4.1.1. Общие закономерности теплопереноса в системе «металл-форма»

При расчете нестационарных тепловых процессов в системе «металл-форма» используется дифференциальное уравнение теплопередачи Фурье [3]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \Delta^2 t, \quad (4.4)$$

где t – температура, К; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; Δ^2 – оператор Лапласа.

Уравнение (4.4) справедливо для теплопереноса в любом твердом веществе.

Теплопередача от жидкого металла в форму в общем виде описывается законом Ньютона [3, 4, 5]:

$$dQ = \alpha(t_M - t_\Phi) dF, \quad (4.5)$$

где dQ – количество тепла, переносимое в единицу времени через поверхность dF , Дж/с; α – коэффициент теплопередачи, Дж/($\text{м}^2\text{сК}$); t_M – температура металла, К; t_Φ – температура формы, К; dF – площадь поверхности охлаждения отливки, м^2 .

На границе металл-форма основной вид теплопередачи – теплопроводность, подчиняющаяся дифференциальному уравнению теплопроводности Фурье:

$$dQ' = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF, \quad (4.6)$$

где dQ' – количество тепла, переданное металлом форме в единицу времени, Дж/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\frac{\partial t}{\partial n}$ – температурный градиент по слоям формы, К/м; dF – поверхность отливки, м².

Кинетика затвердевания жидкого металла в форме описывается уравнением Стефана (закон квадратного корня затвердевания):

$$X = K\sqrt{\tau}, \quad (4.7)$$

где X – толщина затвердевшего слоя металла, м; τ – время затвердевания, ч; K – коэффициент затвердевания, м/ч^{1/2}.

Формула Стефана справедлива для затвердевания в форме плоской стенки чистого металла.

4.1.2. Теплофизические свойства литейной формы

Расчет теплового воздействия заливаемого расплава на форму невозможен без знания ее теплофизических свойств, характеризующих определенными коэффициентами.

Теплофизическими коэффициентами литейной формы являются удельная теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, теплоаккумулирующая способность [2, 9, 10].

Удельная теплоемкость характеризует теплопоглощающую способность формы. Она зависит от вида смеси, ее влажности и температуры. С повышением температуры и влажности удельная теплоемкость формовочной смеси увеличивается. Теплопоглощающая способность литейной формы в целом является положительным свойством, поэтому более выгодными являются смеси с большой удельной теплоемкостью.

Теплопроводность формы определяется количеством тепловой энергии, которая пройдет за единицу времени через поверхность, перпендикулярную к направлению теплового потока, отнесенную к градиенту температур. Коэффициент теплопроводности у большинства формовочных смесей с повышением температуры нагрева возрастает. Лишь у смесей с магниевым и корундовым наполнителями теплопроводность при повышении температуры уменьшается.

Теплопроводность форм снижается с повышением их пористости и увеличивается с повышением их влажности. Это повышение в первую очередь связано с переносом тепла при миграции водяного пара и продуктов горения.

Теплопроводность формы влияет на скорость отвода тепла от отливки в форму. Скорость затвердевания, а, следовательно, характер процессов кристаллизации расплава и пригарообразования на отливках существенно за-

висят от скорости отвода тепла. Чем более теплопроводна форма, тем меньше опасность образования пригара на поверхности отливки и выше вероятность формирования ее мелкозернистой структуры, обеспечивающей улучшение механических свойств и качества отливки.

Температуропроводность формы определяется скоростью, с которой повышается ее температура при нагревании, и может быть рассчитана по формуле

$$a_{\phi} = \frac{\lambda}{C\rho}, \quad (4.8)$$

где a_{ϕ} – коэффициент температуропроводности формы, м²/с; λ – теплопроводность формы, Вт/м·К; C – удельная теплоемкость формы, Дж/кг·К; ρ – плотность формы, кг/м³.

Коэффициент температуропроводности показывает величину температурного перепада в форме при ее принудительном нагреве и охлаждении.

Для определения охлаждающего действия формы рассчитывается ее теплоаккумулирующая способность:

$$e_{\phi} = \sqrt{C\lambda\rho}, \quad (4.9)$$

где e_{ϕ} – коэффициент теплоаккумулирующей способности формы, Дж/м²с^{1/2}К.

Количество тепла Q_{ϕ} , Дж, аккумулируемого литейной песчаной формой, может быть определено по формуле

$$Q_{\phi} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e_{\phi} F (T_{\text{кр}} - T_{\phi}) \sqrt{\tau}, \quad (4.10)$$

где F – площадь контакта отливки с формой, м²; $T_{\text{кр}}$ – температура кристаллизации металла, К; T_{ϕ} – начальная температура формы, К; τ – продолжительность контакта металла с формой, с.

4.1.3. Инженерные методы расчета затвердевания отливок в форме

Существующая теплофизическая теория затвердевания отливок не дает такого общего решения задачи расчета теплообмена отливки с формой, которое охватывало бы все встречающиеся в практике случаи многообразных конфигураций и размеров отливок, различных условий охлаждения и широкого диапазона теплофизических свойств сплавов. В этой теории главную роль играют математически строгие решения, относящиеся к предельно упрощенной схеме затвердевания металла.

Для практики технологические условия формирования отливок могут быть учтены по методу Н.Г.Гиршовича, Ю.А.Нехендзи и Б.Б.Гуляева, который состоит в том, что первоначально расчет ведется по строгим форму-

лам классического решения, а затем в него вводятся поправки на влияние технологических факторов. При этом классическое решение представляется в критериальном виде [3].

Наибольшее значение имеют следующие критерии теплового подобия.

Критерий скрытой теплоты затвердевания

$$K_L = \frac{L}{C(t_3 - t_\Phi)}, \quad (4.11)$$

где L – скрытая теплота затвердевания металла, ккал/кг; C – удельная теплоемкость металла, ккал/(кг·°C); t_3 – температура кристаллизации металла, °C; t_Φ – начальная температура формы, °C.

Критерий тепловой активности

$$K_B = \frac{b_\Phi}{b_M}, \quad (4.12)$$

где b_Φ , b_M – коэффициенты теплоаккумулирующей способности формы и металла, ккал/(м²·°C·ч).

Критерий коэффициента затвердевания

$$K_K = \frac{K}{\sqrt{a_M}}, \quad (4.13)$$

где K – коэффициент затвердевания металла, м/ч^{1/2}; a_M – коэффициент температуропроводности металла, м²/ч.

Расчеты тепловых процессов в системе «металл–форма» с использованием указанных критериев обеспечивают решение следующих основных задач:

- определение продолжительности затвердевания отливок в форме;
- построение температурного поля отливки и формы (период затвердевания).

Расчет продолжительности затвердевания в форме отливки ведется с использованием ее приведенной толщины, определяемой по формулам

$$R = \frac{V}{F}, \quad (4.14)$$

$$R = \frac{F}{P}, \quad (4.15)$$

где R – приведенная толщина отливки, м; V – объем отливки, м³; F – площадь поверхности охлаждения отливки, м²; P – периметр поверхности охлаждения отливки, м.

При условиях $X = R$ и $\tau = \tau_3$ в уравнении (4.7) продолжительность затвердевания отливки в форме может быть определена по формуле

$$\tau_3 = \left(\frac{R}{K} \right)^2, \quad (4.16)$$

где τ_3 – продолжительность затвердевания отливки в форме, ч; R – приведенная толщина отливки, м; K – коэффициент затвердевания отливки, м/ч^{1/2}.

Уравнение (4.16) справедливо для случая затвердевания металла, кристаллизующегося при постоянной температуре, залитого без перегрева.

Для учета влияния перегрева и кристаллизации расплавов в интервале температур на продолжительность затвердевания отливок используются уравнения

$$L = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\epsilon_{\Phi} \theta_3 \sqrt{\tau_0}}{R \rho_M}, \quad (4.17)$$

$$\theta_3 = t_3 - t_{\Phi}, \quad (4.18)$$

$$\tau_0 = \pi \left(\frac{LR \rho_M}{2 \epsilon_{\Phi} \theta_3} \right)^2, \quad (4.19)$$

$$\tau_3 = \tau_0 \mu_{\text{ПЕР}} \mu_{\text{ИНТ}}, \quad (4.20)$$

$$\mu_{\text{ПЕР}} = 1 + \beta \frac{C_{\text{Ж}} \Delta t_{\text{Ж}}}{L}, \quad (4.21)$$

$$\mu_{\text{ИНТ}} = 1 + 2 \frac{C_{\text{Ж}} \Delta t_{\text{ИНТ}}}{L}, \quad (4.22)$$

где L – скрытая теплота кристаллизации сплава, ккал/кг; ϵ_{Φ} – коэффициент теплоаккумулирующей способности формы, ккал/(м²·°С·ч); R – приведенная толщина отливки, м; ρ_M – плотность жидкого металла, кг/м³; τ_0 – продолжительность затвердевания отливки, залитой без перегрева, ч; t_3 – температура заливки металла, °С; t_{Φ} – начальная температура формы, °С; $\mu_{\text{ПЕР}}$ – коэффициент, учитывающий перегрев металла над линией ликвидус; $\mu_{\text{ИНТ}}$ – коэффициент, учитывающий кристаллизацию сплава в интервале температур; β – технологический коэффициент, учитывающий материал формы и конфигурацию отливки, $\beta = 0,15 \dots 1,75$; $C_{\text{Ж}}$ – удельная теплоемкость жидкого металла, ккал/(кг·°С); $\Delta t_{\text{Ж}}$ – перегрев металла над линией ликвидус, °С; $\Delta t_{\text{ИНТ}}$ – интервал кристаллизации сплава, °С.

При известных параметрах (конфигурация и размеры отливки, тип сплава и вид формы, температура заливки, интервал кристаллизации и перегрев металла над линией ликвидус, начальная температура формы) методика расчета продолжительности затвердевания отливки в форме включает следующие этапы:

- выбор значения коэффициента теплопроводности в зависимости от типа сплава;
- определение критерия скрытой теплоты затвердевания (K_L), исходя из типа сплава;
- выбор значения критерия тепловой активности формы (K_B) в зависимости от типа сплава и формы;
- определение критерия коэффициента затвердевания по значениям K_L и K_B , используя график, представленный на рис. 4.1;
- расчет коэффициента затвердевания расплава по формуле (4.13);
- определение приведенной толщины отливки по уравнению (4.14);
- расчет продолжительности затвердевания отливки в форме по формуле (4.16) для кристаллизации металла при постоянной температуре и залитого без перегрева над линией ликвидус;
- определение продолжительности затвердевания отливки в форме с применением уравнений (4.17)...(4.22) для случая кристаллизации сплава в интервале температур и при перегреве расплава над линией ликвидус.

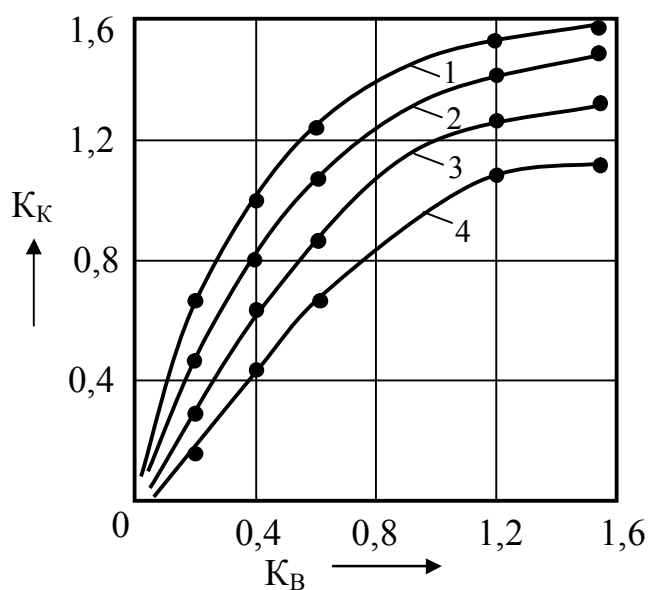


Рис. 4.1. График для определения критерия коэффициента затвердевания металла: 1 – сталь при $K_L = 0,25$; 2 – медь при $K_L = 0,32$; 3 – чугун при $K_L = 0,4$; 4 – алюминий при $K_L = 0,57$

Ниже представлена методика расчета температурного поля отливки и формы при следующих допущениях:

- металл кристаллизуется при постоянной температуре;
- рассматривается затвердевание плоской стенки отливки;
- теплофизические свойства металла и материала формы не зависят от температуры;
- не учитывается конвективное перемешивание в жидком металле, основной вид теплопередачи – теплопроводность;
- полубесконечное тело, имитирующее отливку, соприкасается с другим полубесконечным телом, представляющим форму.

С учетом принятых допущений определенным образом упрощаются математические выводы формул, и построение температурного поля отливки и формы базируется на использовании следующих уравнений:

$$\frac{\theta_3}{\theta_{\Pi}} = 1 + K_B \operatorname{erf}\left(\frac{1}{2K_K}\right), \quad (4.23)$$

$$\Delta t_M = \theta_{\Pi} K_B \operatorname{erf}\left(\frac{X_M}{2\sqrt{a_M \tau}}\right), \quad (4.24)$$

$$\theta_{\Phi} = \theta_{\Pi} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{X_{\Phi}}{2\sqrt{a_{\Phi} \tau}}\right) \right], \quad (4.25)$$

$$\theta_{\Pi} = t_{\Pi} - t_{0\Phi}, \quad (4.26)$$

$$\theta_3 = t_3 - t_{0\Phi}, \quad (4.27)$$

$$\Delta t_M = t_M - t_{\Pi}, \quad (4.28)$$

$$\theta_{\Phi} = t_{\Phi} - t_{0\Phi}, \quad (4.29)$$

где X_M , X_{Φ} – расстояния от поверхности соприкосновения металла и формы, соответственно в сторону металла и формы, м; a_M , a_{Φ} – коэффициенты теплопроводности соответственно металла и формы, м²/ч; τ – время от момента заливки металла, ч; erf – интеграл Гаусса; t_M , t_{Φ} – температуры металла и формы, °С; $t_{0\Phi}$ – начальная температура формы, °С; t_3 – температура затвердевания (кристаллизации) металла, °С; t_{Π} – температура поверхности контакта между отливкой и формой, °С.

Значения интеграла Гаусса могут быть взяты из приложения 4.

Температурное поле отливки и формы представляет собой семейство изохрон – линий, характеризующих изменение температуры с координатой при постоянном времени. Общий вид изохроны температурного поля отливки и формы представлен на рис. 4.2.

Методика расчета с учетом принятых допущений температурного поля отливки и формы включает следующие этапы:

- определение продолжительности затвердевания (τ_3) отливки в форме по ранее представленной методике;
- деление продолжительности затвердевания отливки на интервалы ($\tau_i < \tau_3$);
- определение по формуле (4.7) для полученных значений τ_i координат X_i , соответствующих температуре затвердевания (кристаллизации) металла (t_3);

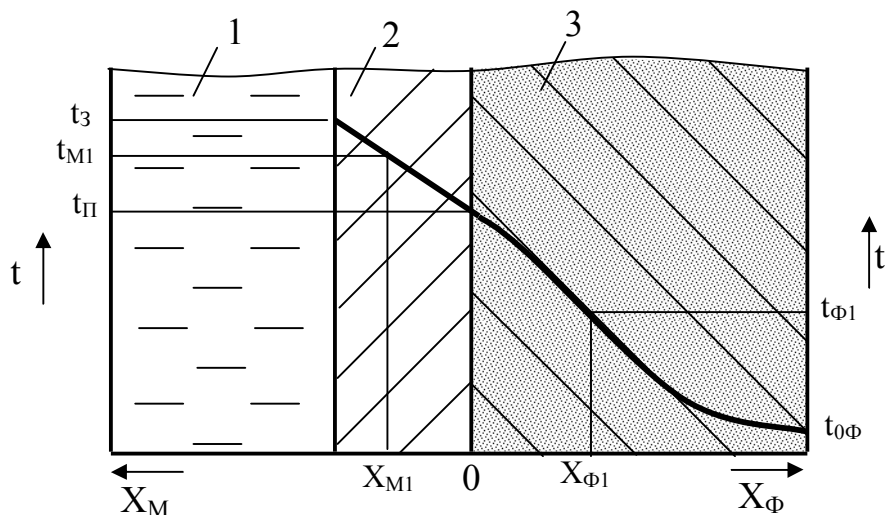


Рис. 4.2. Общий вид изохроны температурного поля отливки и формы:
1 – жидкий металл; 2 – затвердевший металла; 3 – форма

- выбор координат X_i^1 (целые числа) при соблюдении условия ($X_i^1 < X_j$);
- расчет параметров θ_{Π} и t_{Π} соответственно из уравнений (4.23) и (4.26) с учетом формулы (4.27);
- определение Δt_M и t_M соответственно по формулам (4.24) и (4.28) для значений координат X_i^1 и времен τ_i ;
- расчет параметров θ_{Φ} и t_{Φ} , используя уравнения (4.25) и (4.29), для времен τ_i и координат X_i^1 (целые числа) в форме;
- графическое построение изохрон температурного поля отливки и формы.

4.2. Варианты контрольных заданий

Задание 4.2.1. Расчет теплофизических коэффициентов литейной формы

Рассчитать коэффициенты теплопроводности (a_{Φ}) и теплоаккумулирующей способности (ϵ_{Φ}) формы, а также аккумулируемое ею количество тепла в соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 4.1. Расчет количества тепла провести, варьируя продолжительность контакта металла с формой от 10 до 60 с с шагом 10 с. Результаты расчетов представить в виде зависимости $Q = f(\tau)$ для разных составов формовочных смесей. Температуры кристаллизации сплавов, значения параметров C , λ , ρ для различных составов формовочных смесей могут быть взяты из приложений 2 и 3.

Таблица 4.1

Варианты задания 4.2.1

№ варианта	Характеристика формы	Тип сплава	F, м ²	T _ф , К
Пример	Песчано-глинистая сухая. Металлическая (чугун)	Алюминиевый	0,5	298 773
4.1	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Углеродистая сталь	0,5	298
4.2	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Серый чугун	0,8	293
4.3	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Алюминиевый	0,3	290
4.4	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая сырая	Углеродистая сталь	0,2	290
4.5	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая сырая	Серый чугун	0,6	295
4.6	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая сырая	Алюминиевый	0,1	303
4.7	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки. Песчано-глинистая сырая	Углеродистая сталь	0,25	300
4.8	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки. Песчано-глинистая сырая	Серый чугун	0,4	305
4.9	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки. Песчано-глинистая сырая	Алюминиевый	0,15	308
4.10	Песчано-глинистая сухая. Хромомагнетитовая жидко- стекольная	Легированная сталь 20X13НЛ	0,9	298
4.11	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки. Хромомагнетитовая жидко- стекольная	Легированная сталь 20X13НЛ	1,2	295
4.12	Песчано-глинистая сырая. Металлическая (чугун)	Алюминиевый	0,7	293 723
4.13	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки. Металлическая (чугун)	Алюминиевый	0,9	290 573
4.14	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая сырая	Серый чугун	1,5	297

№ варианта	Характеристика формы	Тип сплава	F, м ²	T _ф , К
4.15	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая сырая	Серый чугун	0,9	296
4.16	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая сырая	Алюминиевый	0,4	295
4.17	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Углеродистая сталь	0,7	293
4.18	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Легированная сталь 20Х13НЛ	0,8	296
4.19	Песчано-глинистая сухая. Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Алюминиевый	0,2	294
4.20	Песчано-глинистая сухая. Хромомагнетитовая жидко- стекольная	Легированная сталь 20Х13НЛ	1,4	296

Пример выполнения задания 4.2.1 (вариант «Пример»).

Расчет коэффициента температуропроводности форм из песчано-глинистой сухой смеси по формуле (4.8):

$$a_{\Phi} = \frac{1,28}{1080 \cdot 1650} = 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Определение коэффициента теплоаккумулирующей способности форм по уравнению (4.9):

$$v_{\Phi} = \sqrt{1080 \cdot 1,28 \cdot 1650} = 1510 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{с}^{1/2}\text{К}.$$

Расчет количества тепла, аккумулируемого формой, по формуле (4.10):

$$Q_{\Phi} = \frac{2}{\sqrt{3,14}} \cdot 1510 \cdot 0,5 \cdot (973 - 298)\sqrt{10} = 1773000 \text{ Дж} = 1773 \text{ кДж}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты расчетов теплофизических свойств литейных форм

Характеристика формы	$a_{\Phi} \times 10^7$, м ² /с	v_{Φ} , Дж/м ² с ^{1/2} К	Q, кДж, при различных τ , с					
			10	20	30	40	50	60
1. Песчано-глинистая сухая	7	1510	1773	2507	3070	3545	3963	4342
2. Металлическая (чугун)	70	10012	3557	5030	6161	7115	7955	8714

4.2.2. Расчет температурного поля плоской отливки, залитой без перегрева (период затвердевания)

Расчитать температурное поле плоской отливки по соответствующим вариантам задания, представленными в табл. 4.3. Металл залит в форму без перегрева. Результаты расчетов представить в виде изохрон, изменяя время через каждые 10 мин для песчаной формы и через каждые 2 с для чугунной формы до полной продолжительности затвердевания отливки в форме (τ_3). Теплофизические свойства металлов и критериев K_L и K_B могут быть взяты из приложения 3, а значения критерия K_K определены по графику, представленному на рис. 4.1.

Таблица 4.3

Варианты задания 4.2.2

№ варианта	Металл	Тип формы	Продолжительность затвердевания отливки, τ_3 , мин	Начальная температура формы, °С
Пример	Сталь	Песчаная	60	20
4.21	Сталь	Песчаная	40	20
4.22	Сталь	Песчаная	50	20
4.23	Сталь	Песчаная	30	15
4.24	Сталь	Песчаная	70	25
4.25	Чугун	Песчаная	40	15
4.26	Чугун	Песчаная	50	20
4.27	Чугун	Песчаная	60	25
4.28	Чугун	Песчаная	70	20
4.29	Алюминий	Песчаная	40	20
4.30	Алюминий	Песчаная	50	20
4.31	Алюминий	Песчаная	60	20
4.32	Алюминий	Металлическая	0,13	200
4.33	Алюминий	Металлическая	0,26	250
4.34	Алюминий	Металлическая	0,30	270
4.35	Медь	Песчаная	30	20
4.36	Медь	Песчаная	40	25
4.37	Медь	Песчаная	60	20
4.38	Медь	Металлическая	0,16	300
4.39	Медь	Металлическая	0,23	350
4.40	Медь	Металлическая	0,30	360

Пример выполнения задания 4.2.2 (вариант «Пример»).

По приложению 3 определяем значения критериев K_B и K_L : $K_B = 0,13$; $K_L = 0,25$. По кривой на рис. 4.1 для этих значений находим $K_K = 0,50$.

Из приложения 3 для стали $a = 0,014 \text{ м}^2/\text{ч}$.

Расчет коэффициента затвердевания, используя формулу (4.13):

$$K = 0,5\sqrt{0,014} = 0,059 \text{ м/ч}^{1/2}.$$

Моменты времени, для которых строятся изохроны: $\tau_i = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ мин.

Расчет по формуле (4.7) для указанных значений τ_i координат X_i , соответствующих температуре затвердевания (кристаллизации) металла:

$$X_1 = 0,059\sqrt{\frac{10}{60}} = 0,024 \text{ м}; \quad X_2 = 0,059\sqrt{\frac{20}{60}} = 0,034 \text{ м};$$

$$X_3 = 0,059\sqrt{\frac{30}{60}} = 0,042 \text{ м}; \quad X_4 = 0,059\sqrt{\frac{40}{60}} = 0,048 \text{ м};$$

$$X_5 = 0,059\sqrt{\frac{50}{60}} = 0,054 \text{ м}; \quad X_6 = 0,059\sqrt{\frac{60}{60}} = 0,059 \text{ м}.$$

Построение на графике точек с координатами: абсцисса – ($X_1 \dots X_6$), ордината для всех точек – температура затвердевания (t_3).

Расчет θ_{Π} по формуле (4.23) с учетом данных приложения 4:

$$\theta_{\Pi} = \frac{1490 - 20}{1 + 0,13\text{erf}(1/2 \cdot 0,5)} = 1419 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Определение температуры поверхности контакта металла и формы по формуле (4.26):

$$t_{\Pi} = 1419 + 20 = 1439 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Координаты (целые числа), для которых строятся изохроны: $X_i^1 = 1, 2, 3, 4, 5$ см.

Значения Δt_M температурного поля отливки, рассчитанные по формуле (4.24) и данным приложения 4, для координат X_i^1 и времен τ_i приведены в табл. 4.4. Изохроны температурного поля отливки (период затвердевания) представлены на рис. 4.3.

Таблица 4.4

Значения Δt_M температурного поля отливки

τ_i , мин	Значения Δt_M , $^{\circ}\text{C}$ для координат X_i^1 , см				
	1	2	3	4	5
10	21,4	42,7	–	–	–
20	14,9	29,5	44,0	–	–
30	12,6	24,9	37,1	49,1	–
40	10,7	21,4	32,0	42,5	–
50	10,3	18,6	29,0	39,1	47,1
60	8,7	17,8	26,4	34,7	43,3

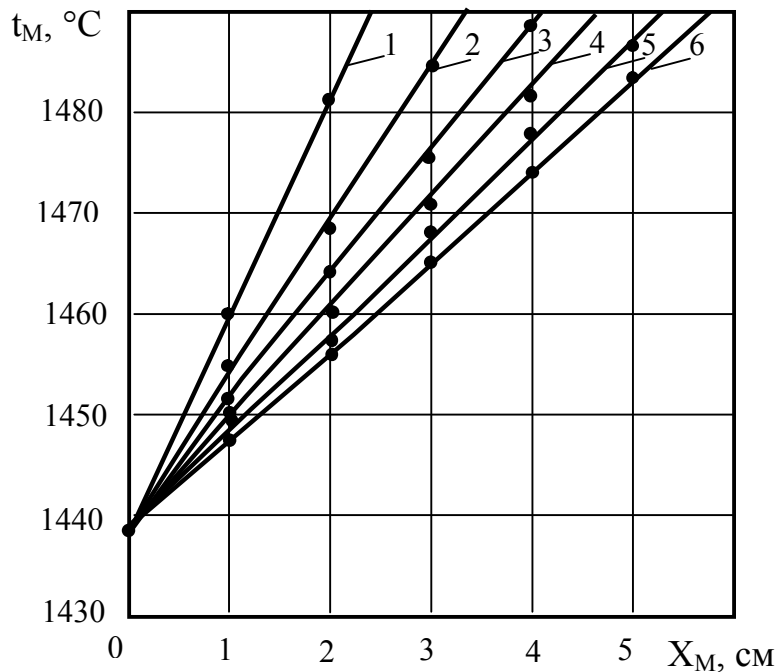


Рис. 4.3. Изохроны температурного поля отливки (период затвердевания): 1 – 10 мин; 2 – 20 мин; 3 – 30 мин; 4 – 40 мин; 5 – 50 мин; 6 – 60 мин

4.2.3. Расчет температурного поля литейной формы в период затвердевания в ней металла

Для условий и исходных данных задания 4.2.2 (табл. 4.3) рассчитать температурное поле формы на толщину 5 см через каждый сантиметр.

Результаты расчетов представить в виде изохрон, изменяя время через каждые 10 мин для песчаной формы и через каждый 10 с для чугунной (металлической) формы до полной продолжительности затвердевания отливки в форме (τ_3). В расчетах использовать значения $t_{\text{П}}$ и $\theta_{\text{П}}$, определенные при выполнении задания 4.2.2, или рассчитать их по приведенной методике.

При вычислении $a_{\text{Ф}}$ использовать данные приложения 2 для песчано-глинистой сырой формы или приложения 3 для металлической (чугунной) формы. Значения интеграла Гаусса могут быть взяты из приложения 4.

Пример выполнения задания 4.2.3 (вариант «Пример»).

Расчет коэффициента температуропроводности формы по формуле (4.8):

$$a_{\text{Ф}} = \frac{1,33}{2100 \cdot 1650} = 3,8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с} = 0,0014 \text{ м}^2 / \text{ч}.$$

Значения $\theta_{\text{Ф}}$ температурного поля формы в период затвердевания металла рассчитаем по уравнению (4.25). Для координаты 1 см и времени 10 мин

$$\theta_{\Phi} = 1419 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0,01}{2 \sqrt{0,0014 \cdot \frac{10}{60}}} \right) \right] = 910^{\circ}\text{C}.$$

Остальные расчетные значения параметра Q_{Φ} сведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Значения θ_{Φ} температурного поля формы в период затвердевания металла

τ_i , мин	Значения θ_{Φ} , °C для координат X_{Φ} , см				
	1	2	3	4	5
10	910	507	229	94	28
20	1057	731	468	274	148
30	1118	839	596	400	254
40	1165	924	705	518	366
50	1181	952	745	562	410
60	1213	1012	824	656	508

Изохроны температурного поля формы в период затвердевания металла представлены на рис. 4.4.

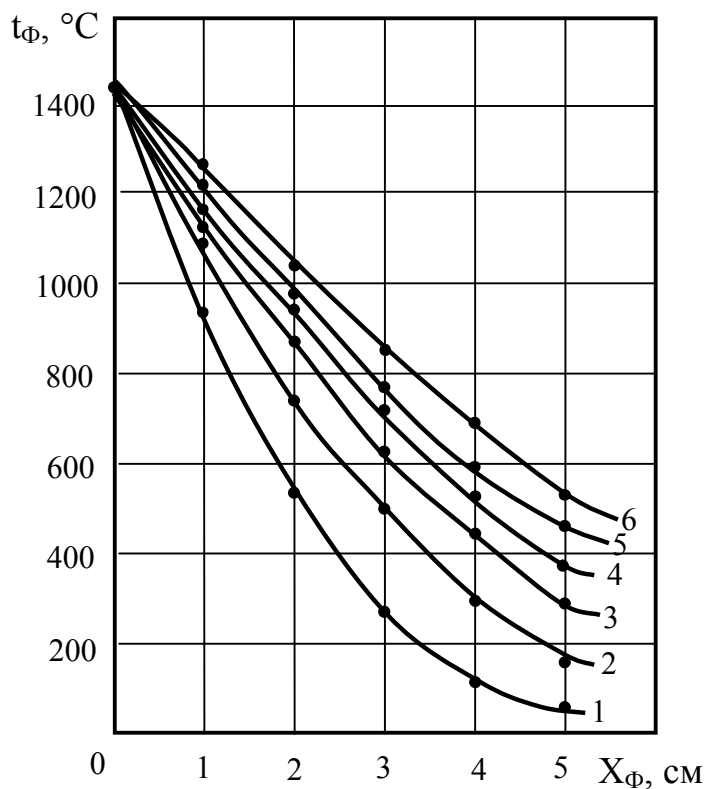


Рис. 4.4. Изохроны температурного поля формы в период затвердевания отливки: 1 – 10 мин; 2 – 20 мин; 3 – 30 мин; 4 – 40 мин; 5 – 50 мин; 6 – 60 мин

4.3. Лабораторные работы

Работа 4.3.1. Моделирование процесса затвердевания расплава в форме

Цель работы. Методом выливания жидкого остатка изучить влияние на скорость затвердевания отливки материала литейной формы.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильное оборудование, набор плавильного, формовочного и измерительного инструмента, секундомер, технологическая оснастка: модель – куб $100 \times 100 \times 100$ мм, опоки высотой 100 мм., металлический штырь диаметром 10...20 мм и длиной 500...1000 мм для пробивки отверстия слива металла в нижнюю опоку, шихта для выплавки алюминиевого сплава (силумин), сухие стержни размером $100 \times 100 \times 30$ мм из смеси состава (по массе): 90 % кичигинского песка, 10 % огнеупорной глины, 4,5 % воды, после сушки в течение 2 ч при $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ($b_{\Phi} = 950 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$), металлические стержни-плитки размером $100 \times 100 \times 50$ мм из чугуна ($b_{\Phi} = 14000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$), пеношамотные вставки ($b_{\Phi} = 730 \text{ Вт} \cdot \frac{\text{с}^{1/2}}{\text{м}^2} \cdot \text{К}$).

Порядок выполнения работы.

1. Изготовить 4–5 форм для определения скорости затвердевания отливки методом выливания (рис. 4.5), используя стержни из сухой песчано-глинистой смеси ($b_{\Phi} = 950 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$), чугунные плитки ($14000 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$) и пеношамотные вставки ($730 \text{ Вт} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{м}^2 \cdot \text{К}$).

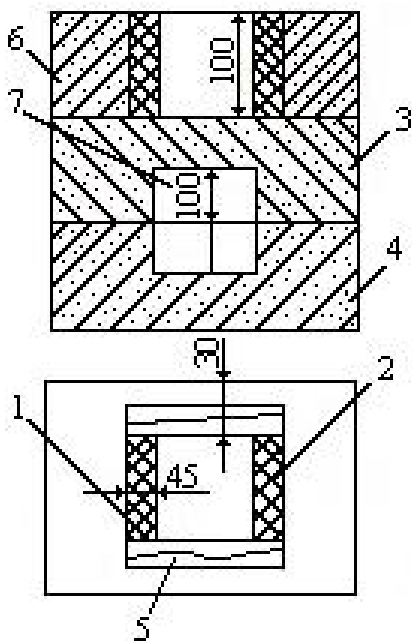


Рис. 4.5. Формы для определения скорости затвердевания отливки методом выливания: 1 и 2 – пеношамотные вставки; 3 и 4 – формы для слива металла; 5 – стержни из материалов с различными теплофизическими свойствами; 6 – полость опытной формы; 7 – полость вспомогательной формы

2. Подготовить алюминиевый расплав.
3. Залить расплав в формы.
4. Через определенный промежуток времени (10, 20, 30, 40 и 50 с) пробить отверстие для слива расплава в нижнюю опоку.
5. Затвердевшую отливку из верхней части форм выбить и охладить до комнатной температуры.
6. Замерить толщины стенок отливок в центре каждой грани.
7. Результаты измерений представить в виде табл. 4.6.
8. Построить графические зависимости $\delta = f_1(\tau)$ и $\delta = f_2(\tau)$ для исследуемых материалов форм.
9. По экспериментальным данным $\delta = f_2\sqrt{\tau}$ вычислить ряд значений коэффициента затвердевания K , определить среднее арифметическое и среднеквадратичное отклонение данного параметра, а также доверительный интервал при вероятности 0,95 для каждого из рассматриваемых материалов литейных форм.

Т а б л и ц а 4.6

Влияние материала формы на кинетику затвердевания отливок

Материал формы	Толщина затвердевшей литейной корки δ , мм, через время τ , с				
	10	20	30	40	50
Сухая песчано-глинистая смесь					
Чугун (металлическая форма)					
Пеношамот					

10. Сделать выводы о влиянии теплофизических свойств литейных форм на скорость затвердевания отливок.

Содержание отчета.

1. Наименование и цель работы.
2. Методику проведения опытов.
3. Эскиз форм.
4. Таблицу результатов эксперимента.
5. Графики и экспериментальные значения коэффициентов затвердевания и их статистическую обработку для различных материалов форм.
6. Выводы.

Работа 4.3.2. Влияние скорости охлаждения образцов на коэффициенты усадки и температуры превращений в сплавах

Цель работы. Научиться определять экспериментально значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и температурного

коэффициента линейного сжатия (коэффициента усадки) (ТКЛС (КУ)) и оценить влияние скорости охлаждения на их величины, а также дать представление о дилатации образцов при превращениях.

Оборудование, инструмент, материалы: дилатометр, образец с размерами D и L . Примечание: образец изготовить заранее из заданного состава с заданными размерами.

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с мерами по технике безопасности.
2. Подготовить дилатометр.
3. Установить необходимый образец в нагреватель дилатометра.
4. Установить координатную бумагу.
5. Включить дилатометр на нагрев и нагреть образец до определенной (по указанию преподавателя) температуры (но не ниже $t_{\text{с}}$.)
6. Выключить дилатометр и охладить образец с определенной скоростью (по указанию преподавателя) до комнатной температуры.

Примечание. Необходимо постоянно следить за ходом усадки по графику на координатной бумаге.

7. Снять бумагу и рассчитать ТКЛР и КУ в каждой области (для сплавов с превращением), а также зафиксировать температуры начала и конца превращения (t^{H} и t^{K}) а величину изменения длины образца при превращении (ϵ , %).

8. Занести полученные результаты в таблицу.
9. Повторить не менее 3-х раз и рассчитать средние, дисперсии и среднеквадратичные отклонения.

Содержание отчета.

1. Название работы.
2. Краткое изложение основных положений теории.
3. Описание методики проведения опытов.
4. Таблица с результатами расчетов и листы координатной бумаги.
5. Выводы.

Работа 4.3.3. Влияние скорости охлаждения сплава на размер его дендритной ячейки

Цель работы. Изучить процессы формирования структуры отливки, ознакомиться с методом ее оценки.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь с рабочей температурой до 900°C и плавильный инструмент, металлографический микроскоп типа МИМ-7, потенциометры самопишущие типа КСП-3, тер-

мопары хромель-алюминиевые из проволоки диаметром 0,3...0,5 мм, установка для резки образцов, установка для полировки шлифов, кокиль для получения отливок диаметром 35...60 мм и высотой до 150 мм, модель для получения отливки с размерами по п.7 в песчаной форме, опоки, формовочный инструмент, ножовка, шлифовальная шкурка, лигатура алюминий-медь, алюминий первичный, реактивы для травления алюминиевого сплава на микроструктуру. Состав: 5...20 % водный раствор NaOH в воде или метиловом спирте, спецодежда.

Порядок проведения работы.

1. Рассчитать необходимое количество алюминия и лигатуры для получения 1,6...2 кг сплава. Состав сплава задает преподаватель.
2. Загрузить шихту в плавильный тигель и довести температуру расплава до 710 ± 10 °С.
3. Изготовить песчаную форму по модели для получения отливки.
4. Собрать и подогреть кокиль до 85 ± 5 °С.
5. Установить в центре сечения на половине высоты полости формы обнаженный рабочий спай термопары и присоединить их к потенциометрам или многоточечному потенциометру.
6. Включить потенциометры и движение ленты для записи изменения температуры сплава во времени.
7. Залить обе формы жидким сплавом.
8. После достижения 300...320 °С отключить потенциометры и отсоединить от них термопары.
9. Извлечь отливки из форм и дать им возможность охладиться на воздухе до нормальной температуры (20...25 °С).
10. Разрезать отливки по месту установки рабочего спая термопары, вырезать возле него образцы размером $20 \times 20 \times 20$ или $15 \times 15 \times 15$ мм.
11. Отрезать кусок диаграммной ленты с помощью кривых охлаждения.
12. Зачистить на образцах напильником или на наждаке площадку размером порядка 10×10 мм, отполировать ее поверхность.
13. Протравить шлиф в растворе, нагретом до 70 °С для выявления дендритной структуры в течение от 30 с до 1 мин. Темный налет на шлифе удалять погружением в концентрированную азотную кислоту.

Обработка опытных данных. По кривым охлаждения, записанным на диаграммной ленте, с учетом скорости ее движения определить скорость охлаждения сплава в интервале кристаллизации при литье в песчаную форму и кокиль. По данным, приведенным в табл. 4.7, построить линии ликвидуса и солидуса сплава алюминий-медь и определить температуры ликвидуса и солидуса исследуемого сплава.

Таблица 4.7

Содержание меди, % мас.	2	5	8	10	15	20
Температура ликвидуса, °С	653	647	633	627	610	590
Температура солидуса, °С	614	570	548	548	548	548

На микроскопе с объект-микрометром и окуляром с сеткой определить по 20...40 измерениям средний размер дендритной ячейки в полученных образцах сплава.

По методике провести статистическую обработку результатов измерения дендритной ячейки. Рассчитать дисперсию и найти доверительный интервал при вероятности 0,95, оценить относительную погрешность измерений.

5. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, УСАДКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ОТЛИВКАХ

5.1. Общие сведения

Процесс формирования структуры в реальных отливках зависит от многих факторов, которые определяются свойствами каждого конкретного сплава, формы и конструкции отливки. На затвердевание влияют теплофизические свойства сплава и формы, температура заливки сплава и формы перед заливкой, металлоемкость формы и средняя толщина стенки отливки и другие факторы.

5.1.1. Строение двухфазной области затвердевания

После выпуска металла из плавильной печи в ковш при температуре t_k в течение времени τ_k металл выдерживается и охлаждается в ковше (рис. 5.1, а). Это необходимо, чтобы доставить ковш от участка плавки к месту заливки форм, а также произвести ковшевые металлургические операции (добавка легирующих и модификаторов для получения заданной структуры и свойств литого металла, рафинирование жидкого металла путем продувки инертными газами, обработки специальными шлаками, вакуумирование, фильтрование через кусковые или сетчатые фильтры и т.д.). По достижении требуемой температуры заливки $t_{зал}$ производится заливка металла в форму. С этого момента и до момента выбивки τ_b (извлечение из формы) металл охлаждается в форме (рис. 5.1, б), отдавая ей свою теплоту перегрева $\Delta t_{пер}$ над ликвидусом, теплоту затвердевания в интервале ликвидус-солидус $\Delta t_{инт}$, а затем теплоту охлаждения в α -твердом состоянии от солидуса t_c до температуры фазового превращения $t_{пр}$ и в $(\alpha + \beta)$ -состоянии до выбивки из формы.

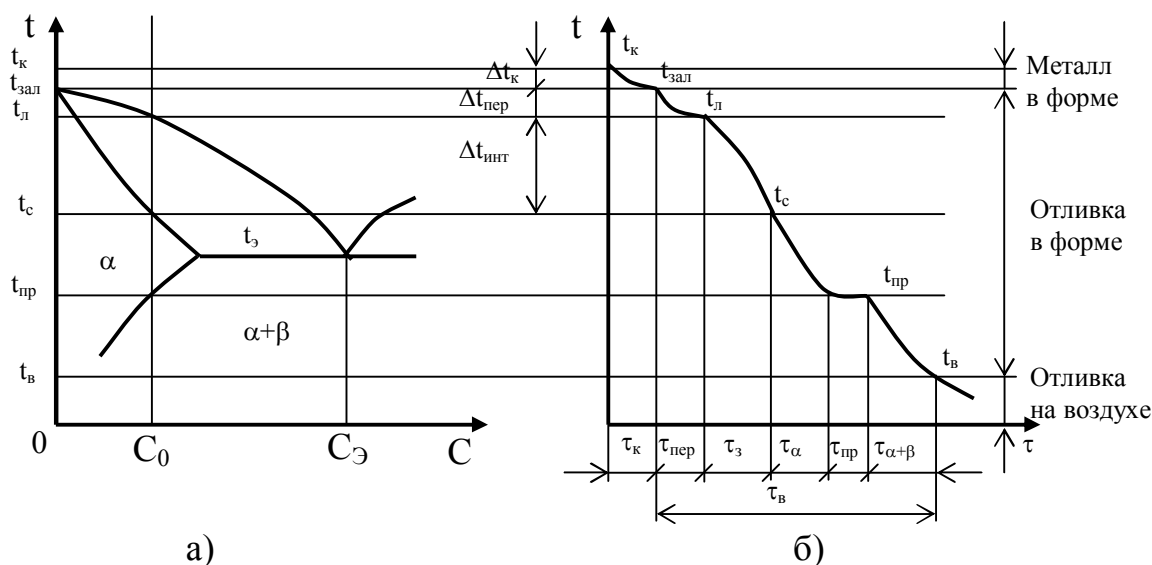


Рис. 5.1. Изменение температуры сплава состава C_0 в процессе формирования отливки по диаграмме состояния (а) и во времени (б) при охлаждении в заливочном ковше, в форме и на воздухе

Дальнейшее охлаждение отливки происходит на воздухе.

За время охлаждения металла в форме от $t_{зал}$ до $t_в$ последовательно происходит ряд процессов, определяющих качество отливки [11]:

- течение металла при заполнении полости формы и внутри затвердевающей отливки;
- кристаллизация металла, то есть переход из жидкого состояния в твердое с образованием центров кристаллизации, рост которых приводит к формированию литой структуры;
- выделение растворенных в металле газов при понижении температуры расплава и в процессе его затвердевания с образованием крупных газовых пузырей (газовых раковин) и микроскопических пузырьков;
- выделение неметаллических включений, их всплывание в жидком металле и удаление, а также застревание в объеме кристаллизующегося твердожидкого металла;
- ликвация примесей в результате избирательной кристаллизации и перемещения жидкой фазы, обогащенной примесями, по сечению отливки с образованием макроскопической (зональной) и микроскопической (дендритной) ликвации;
- объемная усадка (сокращение объема) металла при понижении температуры и фазовом переходе с образованием концентрированных усадочных раковин и рассеянной усадочной пористости;
- линейная усадка (сокращение наружных размеров) отливки, вызывающая появление деформаций, напряжений, коробления и трещин.

Перечисленные процессы, включающие сложный комплекс взаимосвязанных физических явлений теплообмена, гидродинамики, диффузии,

фильтрации и так далее, при нерациональной технологии изготовления отливки приводят к появлению многообразных дефектов.

Литейные сплавы всегда кристаллизуются в интервале температур, и область затвердевания располагается между изотермическими поверхностями в отливке с температурами ликвидуса и солидуса (рис. 5.2).

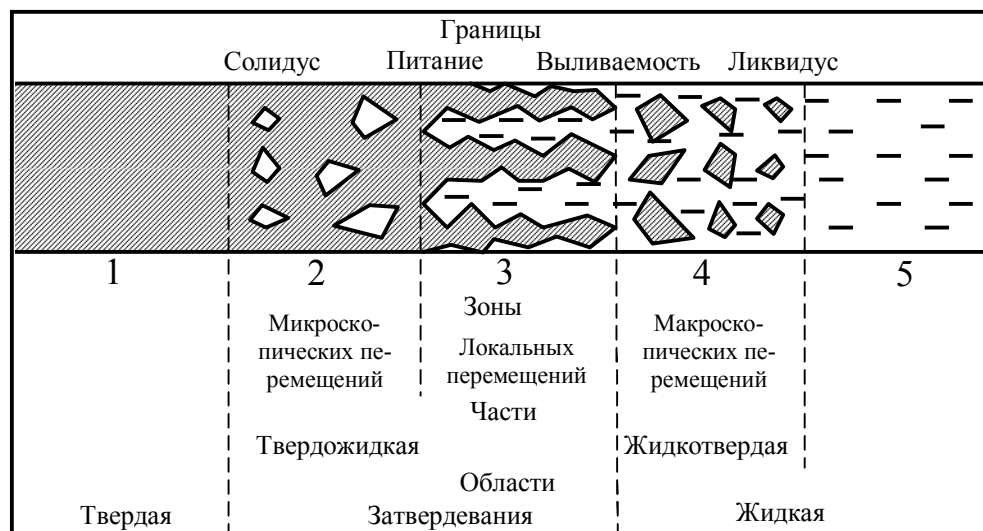


Рис. 5.2. Строение затвердевающей отливки

Область затвердевания состоит из твердожидкой зоны (скелет из твердой фазы и включения жидкой фазы) и жидкотвердой зоны (жидкость с включениями разрозненных выделений твердой фазы).

Если из незатвердевшей отливки вылить жидкую фазу, то с ней удалится жидко-твердая зона. Поэтому граница между двумя зонами области называется выливаемостью.

В твердожидкой зоне выделяется участок, в котором жидкая фаза разобрана растущими кристаллами и не может подпитываться по микроканалам. Граница этого участка – граница питания; на диаграмме состояния она располагается несколько ниже границы выливаемости (нулевой жидкотекучести).

Границы 1, 2, 3, 4, 5 меняются в зависимости от условий охлаждения и характера кристаллизации. Для компактных дендритов и округлых кристаллов успевают образоваться 50...70 % твердой фазы, а граница выливаемости сдвигается к солидусу. При образовании разветвленных дендритов твердый скелет образуется уже при 15...30 % твердой фазы, а граница выливаемости располагается ближе к ликвидусу (рис. 5.3).

Последние исследования в области кристаллизации отливок показали, что во всех отливках можно предполагать определенную последовательность твердения от внешней поверхности к центру. Паттерсон разделяет

последовательное затвердевание на четыре типа (рис. 5.4), а именно: А – экзогенное с ростом компактных кристаллов (рис. 5.4, а); В – экзогенное с ростом дендритных кристаллов (рис. 5.4, б); С – эндогенное с ростом компактных кристаллов (рис. 5.4, в); D – эндогенное с ростом дендритных кристаллов (рис. 5.4, г).

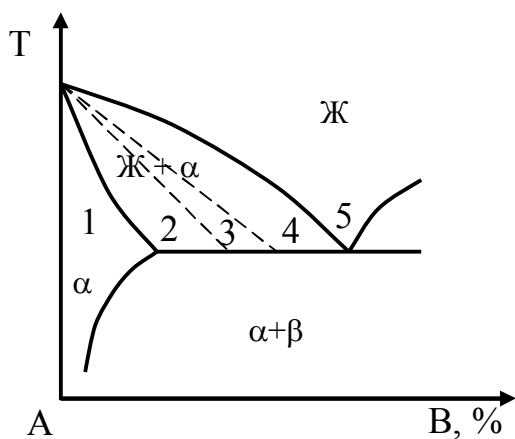


Рис. 5.3. Границы двухфазной области кристаллизации

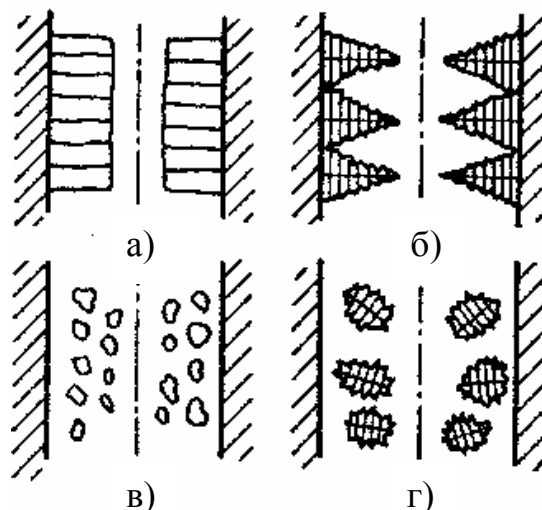


Рис. 5.4. Примеры типичных видов затвердевания расплавов

Механизм протекания процесса затвердевания сильно влияет на характер фронта кристаллизации, от которого, в свою очередь, зависят количество расплава, изолируемого в процессе затвердевания от остального объема жидкой фазы, и склонность к образованию некоторых характерных пороков отливок (микроусадочной пористости и др.).

При одинаковых условиях затвердевания с повышением содержания добавляемого элемента в сплаве происходит переход от экзогенного роста компактных кристаллов к эндогенной дендритной кристаллизации.

Как только температура сплава у стенок формы упадет до температуры ликвидуса, в этой зоне начинается кристаллизация. В случае если сплав затвердевает в интервале температур, то в зоне затвердевания присутствуют две фазы (твердая и жидкая). В момент, когда температура сплава упадет до температуры солидуса, затвердевают остатки жидкой фазы, и во всей отливке будет только твердая фаза. В процессе затвердевания одновременно могут существовать три зоны (рис. 5.5): зона твердого металла ξ , ширина которой со временем непрерывно увеличивается; двухфазная зона δ , ширина которой зависит от интервала затвердевания и градиента температуры; зона расплава φ , ширина которой непрерывно уменьшается.

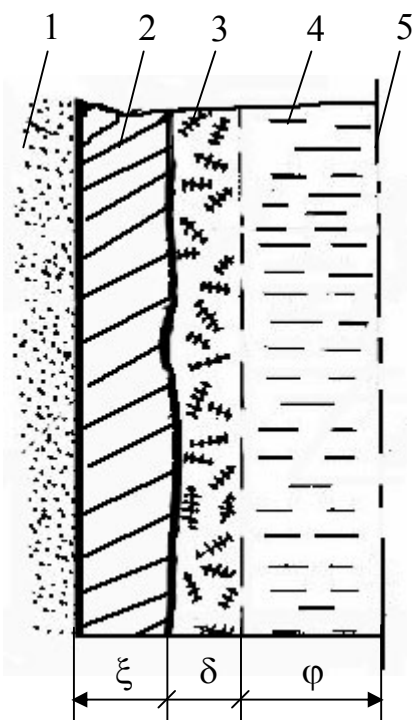


Рис. 5.5. Положение двухфазной зоны в стенке отливки при ее затвердевании: 1 – форма; 2 – твердая фаза; 3 – двухфазная зона; 4 – расплав; 5 – тепловая ось отливки

Поверхность, которая образует границу между зоной твердого металла и двухфазной зоной, называется изосолидусом (температура соответствует солидусу). Поверхность, которая образует границу между двухфазной зоной и зоной расплава, называется изоликвидусом (здесь температура соответствует температуре ликвидуса заливаемого сплава). В чистых металлах или эвтектических сплавах, которые затвердевают при постоянной температуре, двухфазная зона не образуется.

5.1.2. Типы кристаллических структур в отливках

Металлографические исследования показали, что и столбчатые, и равноосные кристаллы начинают расти по дендритному механизму, который затем сменяется ячеисто-дендритным (рис. 5.6).

Двумя основными характеристиками структуры являются протяженность столбчатой зоны (если она имеется) и величина зерна в равноосной области. Эти характеристики могут быть выражены количественно и определяются различными факторами. Последние можно разделить на две группы [11]:

- параметры, определяющиеся металлом;
- параметры, связанные со свойствами формы.



Рис. 5.6. Равноосные зерна в слитке алюминиевого сплава с 2 % Cu: 1 – додендритная зона; 2 – ячеисто-дендритная

В подавляющем большинстве случаев при кристаллизации металлов и сплавов образуются не полногранные кристаллы, а дендриты – особые формы кристаллов, похожие по облику на деревья (отсюда название), где можно различить ствол и боковые ветви, которые разделяются на ветви 1-го и 2-го порядков. Строгого различия между стволами и ветвями нет. Любая ветвь, оказавшись в благоприятных условиях, превращается в ствол. Некоторые исследователи называют стволы ветвями 1-го порядка.

На рис. 5.7 изображена схема ортогонального дендрита, у которого стволы и ветви расположены под углом 90° . Встречаются дендриты с расположением ветвей и стволов под углами 60° , 120° и другие. Направление стволов и ветвей дендритов в этих случаях совпадает с определенными кристаллографическими направлениями кристаллической решетки вещества.

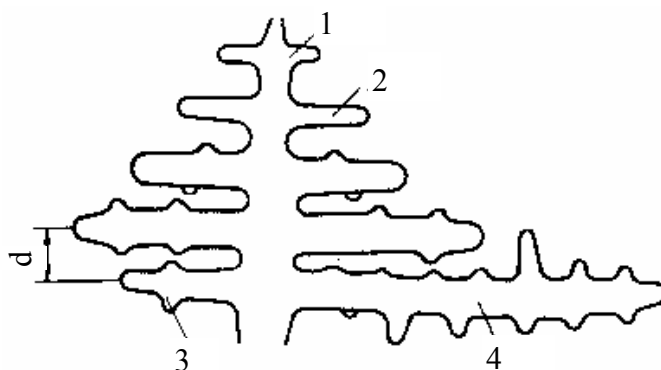


Рис. 5.7. Растущий дендрит:
1 – ствол; 2, 3, 4 – ветви 1-го порядка, 2-го порядка и превращающаяся в ствол соответственно;
d – расстояние между ветвями (дендритный параметр)

Так, у металлов и сплавов с кубическими решетками с ГЦК- и ОЦК-структурой обнаруживаются, как правило, ортогональные дендриты, у которых стволы и ветви идут по направлениям $\langle 100 \rangle$. Однако нередко случается, когда дендриты имеют изогнутые ветви, в расположении которых нельзя усмотреть какой-либо геометрической закономерности.

По экспериментальным данным частота расположения ветвей на стволе дендритов и, следовательно, их толщина связаны с условиями охлаждения при кристаллизации. В общем оказывается, что чем больше скорость охлаждения, тем тоньше ветви и стволы дендритов, тем чаще ветви размещены на стволах.

На металлографических шлифах редко можно видеть дендриты в полной форме. Обычно выявляются поперечные сечения многочисленных ветвей и стволов дендритов, заполняющих сплошь поверхность шлифа. Каждое такое сечение принято называть дендритной ячейкой.

Средний размер (диаметр) дендритной ячейки равен расстоянию между ветвями дендритов d (см. рис. 5.7), если сплав является твердым раствором. Если, кроме твердого раствора, в структуре сплава есть эвтектическая составляющая, она будет залегать между ветвями дендритов, по границам дендритных ячеек. В этом случае дендритная ячейка окажется меньше, чем расстояние между ветвями на отдельном изолированном дендрите.

Важнейшей характеристикой дендритной кристаллизации и образующейся при этом дендритной структуры является величина дендритной ячейки или дендритный параметр d (см. рис. 5.7). Общей характеристикой дендритной кристаллизации и структуры является обратная связь между размером дендритной ячейки и скоростью охлаждения сплава. Даже при разных основах сплава количественные различия в ходе кривой в общем незначительны. Это объясняется тем, что решающая роль в образовании дендритов принадлежит диффузии в расплаве, а величина коэффициента диффузии во всех жидких металлах находится в достаточно узких пределах $[(1 \dots 7) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}]$.

Обычный размер дендритной ячейки в литых заготовках составляет 20-200 мкм, и он тем меньше, чем больше была скорость охлаждения при кристаллизации сплава в процессе затвердевания заготовки.

Дендритная кристаллизация является типичным случаем неравновесной кристаллизации, при которой происходит ограниченный диффузионный массоперенос в твердой и жидкой фазах и между ними.

5.1.3. Регулирование кристаллизационных процессов

Основная задача литейщиков – получить отливку с заданным размерами и формой макрозерна, а также с определенной микроструктурой. Суще-

ствуется множество технологических приемов, позволяющих управлять структурой отливки. Рассмотрим наиболее эффективные способы.

Увеличение скорости охлаждения отливки влечет за собой увеличение скорости затвердевания $v_{\text{затв}}$ и скорости кристаллизации отдельных структурных составляющих. Первичные дендриты становятся короче, их оси тоньше, измельчается эвтектика и другие составляющие. На рис. 5.8 показана зависимость размеров макрозерна 1, междусосного расстояния дендритов 2 (микрозерна), и межпластинчатого расстояния в эвтектике 3 от скорости затвердевания.

С увеличением скорости охлаждения происходит измельчение всех структурных составляющих сплава (рис. 5.8).

Направленное затвердевание и кристаллизация создают в структуре сплава четкую ориентировку по оси теплоотвода. Предельно оптимальным случаем является создание монокристаллического состояния, когда структура всей отливки представляет собой зерно (монодендрит или ячеистый коробчатый дендрит).

При направленной кристаллизации эвтектических сплавов эвтектический пакет растет только в продольном направлении за счет удлинения пластинок и возникает волокнистый материал (литой композиционный материал). Волокна интерметаллидной фазы формируют твердый раствор и обеспечивают высокую жаропрочность сплава.

Модифицирование сплавов способствует формированию мелкозернистой структуры и зависит от типов модификаторов и технологии их применения [11].

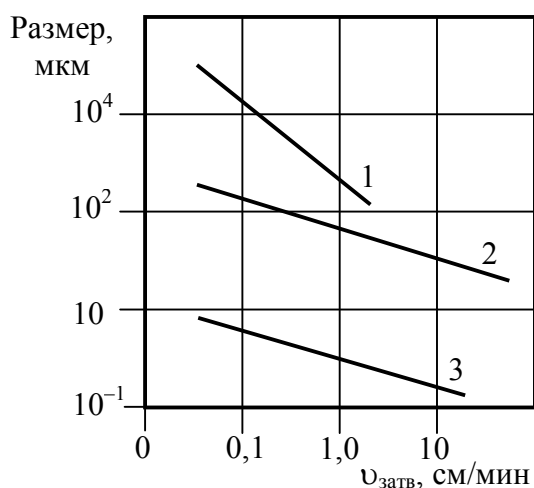


Рис. 5.8. Зависимость размера макрозерна (1), междусосного расстояния дендритов (2) в стали и межпластинчатого расстояния в эвтектике $\text{Al}+\text{CuAl}_2$ (3) от скорости затвердевания сплава $v_{\text{затв}}$

Рассмотрим воздействие модификаторов на отдельные структурные составляющие сплава. В сплавах – твердых растворах (рис. 5.9, 1) происходит измельчение первичного зерна 2. Если в сплаве 1 происходит фазовая перекристаллизация 3, то измельчается также и вторичное зерно 4. Такая зависимость характерна для углеродистых сталей с ферритно-перлитной структурой. В сплавах с первичными выделениями и эвтектикой 5 происходит измельчение обеих структурных составляющих 6; вместо крупнопластинчатой эвтектики 7 образуется тонкопластинчатая с очень короткими пластинами 8. Крупные отдельные структурные составляющие 9 могут сильно измельчаться 10 либо коагулировать 11 и сфероидизироваться 12. Это характерно для структур серого и высокопрочного чугунов.

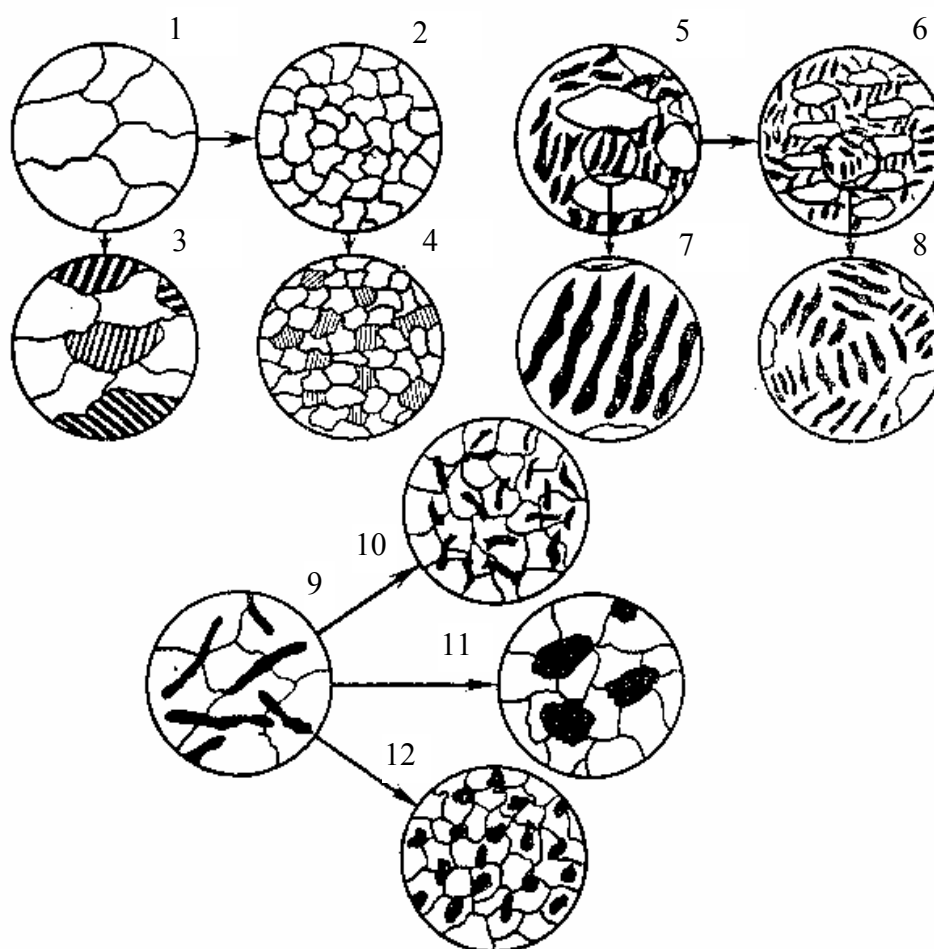


Рис. 5.9. Влияние модификаторов на структурные составляющие сплавов

В результате модифицирования улучшаются механические свойства, уменьшается загрязненность газами, возрастает плотность отливки.

Необходимо подчеркнуть три закономерности.

1. За счет измельчения грубых составляющих повышается пластичность сплавов.

2. Эффект модифицирования усиливается при увеличении скорости охлаждения отливки.

3. Модифицирование приводит к выравниванию свойств сплава по сечению отливки и поэтому особенно эффективно для крупногабаритных отливок.

Механические свойства чугуна зависят от структуры металлической основы и от формы, размеров, количества и распределения включений графита. В обычном сером чугуне графит кристаллизуется в форме пластинок. Они, с одной стороны, снижают эффективную площадь сечения металлической основы, а с другой, в углах пластин концентрируют напряжения. Поэтому чугун с пластинчатым графитом обладает невысокими прочностными и особенно пластическими характеристиками.

Если в процессе кристаллизации чугуна графит выделяется в виде глобулей (шариков), то механические свойства такого чугуна приближаются к механическим свойствам стали. Временное сопротивление σ_b при растяжении у чугуна с шаровидным графитом выше, чем у чугуна с пластинчатым графитом в 2...4 раза. Чугуны с шаровидным графитом обладают значительной пластичностью, тогда как обычный серый чугун разрушается хрупко.

Существует несколько точек зрения на механизм образования шаровидного графита в чугуне. Например, согласно Н.Г. Гиршовичу характер выделения графита в самостоятельную фазу при кристаллизации чугуна определяется соотношением скоростей кристаллизации и диффузии. Если диффузия атомов углерода обеспечивает максимально возможную скорость роста кристалла, то каждая его грань растет со скоростью, определяемой строением кристаллической решетки. При этом наиболее развитой оказывается грань, обладающая наименьшим значением межфазной энергии на границе с жидким расплавом. Для графита, имеющего гексагональную слоистую решетку, характерной будет пластинчатая форма кристаллов.

Такие условия создаются при медленном отводе тепла (при малом переохлаждении ΔT_1 , рис. 5.10). При увеличении скорости теплоотвода (при значительном переохлаждении ΔT_2 , рис. 5.10) диффузия начинает тормозить приток атомов углерода и становится лимитирующим процессом роста базисной грани. В результате выделения графита становятся более округлыми.

Если приток атомов с разных сторон к растущему кристаллу окажется равномерным, то форма графита будет близка к шаровидной.

При большой скорости охлаждения отливки и при малом содержании углерода и кремния в чугуне скорость диффузии атомов углерода уменьшается настолько, что выделение графита в самостоятельную фазу затруднено. Углерод в этом случае выделяется в форме цементита и образуется белый чугун.

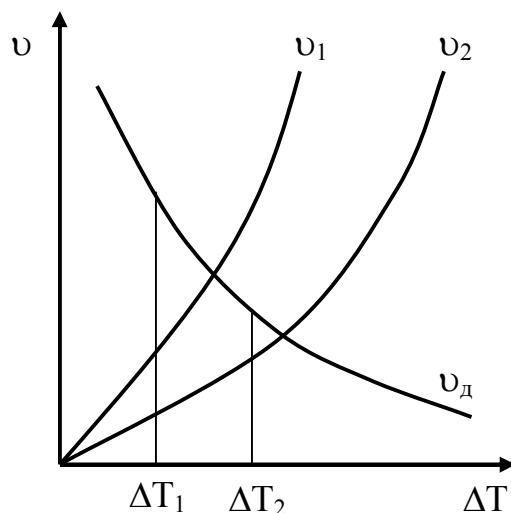


Рис. 5.10. Влияние переохлаждения ΔT на развитие процесса графитизации в чугунах:
 v – скорость процесса; v_1 – скорость роста базисной грани;
 v_2 – то же торцевой грани; v_d – скорость диффузии

Следовательно, для получения шаровидного графита необходимо: уменьшение скорости диффузии v_d по сравнению со скоростью роста базисной грани v_1 , то есть $v_d/v_1 < 1$; равномерный со всех сторон поток атомов углерода к растущему кристаллу графита.

Магний и церий, по-видимому, образуют адсорбционные пленки на зародышах графита, резко понижая при этом отношение v_d/v_1 . Известно, что обработка жидкого чугуна магнием и церием способствует образованию шаровидной формы графита при затвердевании чугуна.

Однако следует иметь в виду, что не все стороны влияния поверхностно-активных элементов на сфероидизацию графита изучены в полной мере. Например, известно, что также поверхностно-активные примеси, как сера и кислород, препятствуют образованию шаровидного графита при первичной кристаллизации чугуна.

Для получения шаровидного графита в отливках следует выбрать модификаторы, которые должны достаточно глубоко очищать жидкий чугун от серы и от кислорода; обладать поверхностной активностью, обеспечивающей за счет образования адсорбционных пленок ограничение потока углерода, достаточное для роста графита в диффузионном режиме.

Роль магния и церия как сфероидизаторов графита в чугунах общеизвестна. Хорошо известна также рафинирующая способность этих элементов, обеспечивающих чистоту чугуна по сере и по кислороду.

Однако использование металлического магния при обработке жидкого чугуна на шаровидный графит сопровождается значительным испарением. Можно получать модифицированный чугун, обрабатывая его лигатурой

никель-магний, содержащей 10...12 % магния. Эта легатура тонет в жидком чугуна, при этом магний испаряется в меньшей степени.

Применение церия в чистом виде ограничивается высокой стоимостью этого металла. Можно вводить его в жидкий чугун в составе легатуры никель-мишметалл, содержащей 40 % мишметалла. Мишметалл – это сплав церия (51 %), лантана (20,5 %), железа (5,6 %) с рядом других редкоземельных элементов. Ввиду того, что введение в чугун магния и церия способствует отбеливанию, после модифицирования жидкий расплав необходимо обработать дополнительно ферросилицием марки ФС75 в количестве 0,3...0,8 % от веса жидкого металла.

Вибрация расплавов позволяет измельчать структуру отливок за счет того, что колебания разрушают покровные оксидные пленки на расплаве у стенок формы, в результате скорость охлаждения увеличивается, то есть облегчается образование кристаллов и измельчается структура наружного слоя отливки. Кроме того, колебания облегчают отделение кристаллов от стенки формы в начальный период затвердевания и их осаждение, формирующее равноосную зону.

Наложение вибраций наиболее эффективно в начальный период, причем вибрация должна осуществляться до тех пор, пока температура не снизится до определенного уровня, при котором отделившиеся кристаллы могут сохраняться, то есть не расплавляться полностью.

Перемешивание расплава в форме вызывает бурное колебание поверхности расплава, что способствует отделению неустойчивых кристаллов в зоне контакта расплава со стенками формы, и измельчению зерна.

Ультразвуковая обработка (УЗО) заключается в воздействии на расплав механическими колебаниями с частотой порядка $10^3 \dots 10^7$ Гц. При УЗО возникает кавитация по всему объему, которая приводит к дроблению первичных зерен, более легкому отделению зарождающихся на стыках формы кристаллов, равномерному распределению примесей и твердых частиц. Дробятся и измельчаются первичные выделения металлидов в сплавах или графита в чугунах, изменяется строение и дисперсность эвтектики. Наиболее эффективным является использование УЗО с модифицированием. Например, УЗО алюминия, модифицированного 0,25 % титана, приводит к повышению пластичности почти вдвое. Кроме того, УЗО способствует лучшему выделению газов из расплава и предотвращает неоднородность по составу и свойствам.

Обработка электрическими и магнитными полями (ЭМО) в ряде случаев дает такой же эффект как и УЗО.

Из перечисленных способов механического воздействия наиболее простыми является вибрация и перемешивания, а УЗО и ЭМО требуют применения в технологическом процессе дорогостоящего оборудования и поэтому используются в исключительных случаях.

При суспензионном литье в заливаемый в форму сплав через специальный канал вводится металлический порошок размером частиц 0,1 мм в количестве 3...10 %. Он состоит из раскислителей, легирующих добавок или промежуточного сплава на той же основе. Порошок дает гетерогенные центры кристаллизации по всему объему и ускоряет охлаждение отливки.

Термовременная обработка сплава перед заливкой позволяет регулировать кристаллизационные процессы. При перегреве выше температуры ликвидуса происходит дезактивация примесей, уменьшение количества и размеров кластеров. Однако установлено, что при значительных перегревах сплав приобретает склонность к мелкокристаллическому строению в результате зарождения в процессе охлаждения мелких кластеров и твердых включений равномерно по всему объему расплава.

5.1.4. Механизм усадки и образование усадочных дефектов

Под усадочными процессами понимают совокупность явлений сокращения размеров и объема металла, залитого в форму, при его затвердевании и охлаждении. В отдельных случаях при кристаллизации литейных сплавов происходит выделение новых фаз с увеличенным удельным объемом, что уменьшает усадку на отдельных этапах формирования отливки. Усадочные процессы вызывают появление в отливках различных дефектов, к которым относятся: усадочные пустоты (усадочные раковины, усадочная пористость), усадочные деформации (линейная усадка, коробление), трещины, остаточные напряжения.

При затвердевании объем металлов обычно сокращается, однако для галлия, сурьмы, висмута и лития затвердевание сопровождается не сжатием, а расширением.

Численные характеристики изменения размеров тел при охлаждении называют коэффициентами усадки.

Образование усадочных раковин у отливки происходит в четыре стадии (рис. 5.11). На первой стадии (рис. 5.11, а) полость формы заполнена расплавом, залитым при температуре ликвидуса, так что расплав начинает затвердевать сразу же после контакта с формой, а затем затвердевает постепенно. На второй стадии (рис. 5.11, б) затвердевает корка – получается своего рода закрытый сосуд, внутри которого заключен расплав. По мере охлаждения происходит усадка расплава и затвердевшей корки, а также имеет место уменьшение объема при изменении агрегатного состояния (на плоскости кристаллизации). Усадка расплава и уменьшение объема при переходе из жидкого состояния в твердое превышают усадку корки (то есть уменьшение сечения в свету). Поэтому в определенный момент расплав отделяется под действием силы тяжести от верха затвердевшей корки и опускается (рис. 5.11, в). Над расплавом остается полость – закрытая

усадочная раковина (рис. 5.11, г). В образовавшейся раковине в отливках из дегазированных сплавов создается разрежение, вследствие чего верхняя тонкая корка может прогнуться внутрь раковины (пунктирные линии на рис. 5.1, в, г). Таким образом, усадочная раковина состоит из наружной (впадины) и внутренней частей.

Чтобы не допустить образования в отливке усадочной раковины, надо к отливке присоединить резервуар сплава – прибыль (рис. 5.11, д), из которой под действием силы тяжести расплав переместится в затвердевающую отливку. Усадочная раковина в этом случае образуется только в прибыли, которую отделяют от отливки.

Усадочной раковиной называют группу концентрированных пустот (или одну пустоту), образующихся в результате усадки сплава.

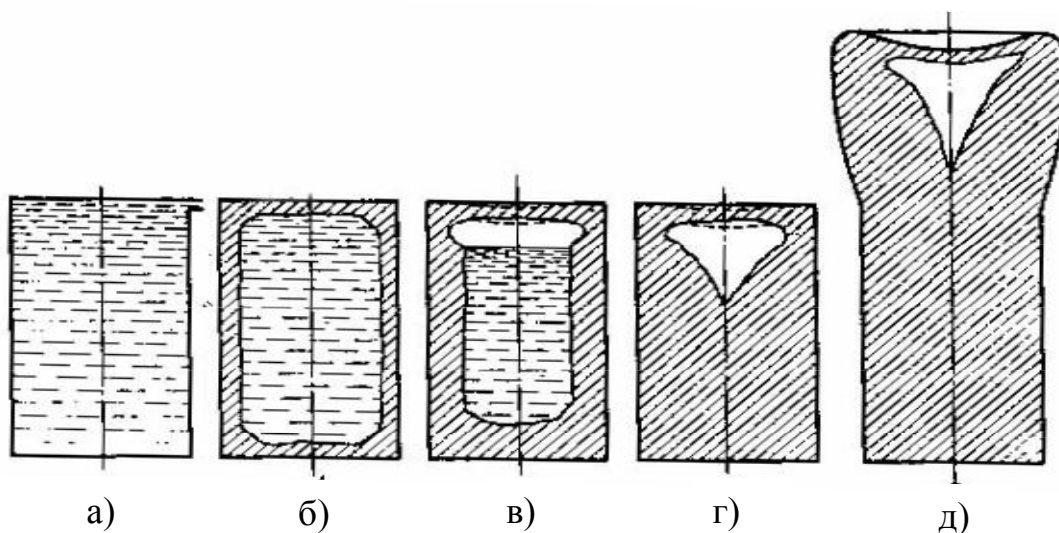


Рис. 5.11. Ход образования усадочной раковины у отливки

Часть отливки, в которой располагаются усадочные раковины, называется областью усадочной раковины.

Слой металла, разделяющие пустоты усадочной раковины и закрывающие ее сверху, называют мостами. В плоских отливках мосты более развиты (рис. 5.12). Если раковина сверху закрыта мостом, она называется закрытой (рис. 5.12, а–в), при отсутствии мостов раковина называется открытой (рис. 5.12, г). В случае опускания зеркала расплава или деформации затвердевшей корки на поверхности отливки образуется утяжина (рис. 5.12, б).

Если в процессе затвердевания отливки какая-то ее часть обособляется, в ней образуется изолированный бассейн и возникает самостоятельная вторичная усадочная раковина.

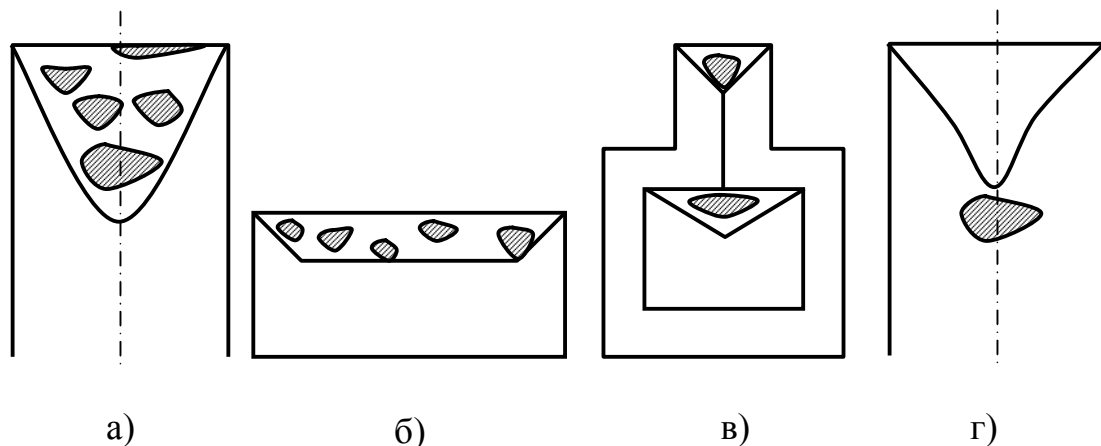


Рис. 5.12. Типы усадочных раковин

В зависимости от массы отливки, типа сплава и литейной формы, характера кристаллизации, усадка может проявляться не в виде концентрированной раковины, а в виде множества мелких пустот, называемых усадочной пористостью.

Формирование пор происходит на микроструктурном уровне и связано с фильтрацией жидкого металла между твердыми кристаллами в области затвердевания.

Усадочная пористость делится на следующие виды:

- рассеянная, распределенная более или менее равномерно по всему объему отливки;
- зональная, сосредоточенная в определенных зонах или частях отливки (в осевых частях плоских и призматических отливок, в утолщениях и сопряжениях стенок и др.).

Каждая пара возникает в результате усадки микроскопического объема жидкого металла, обособленного от зоны локальных перемещений в результате неравномерного роста дендритов. Чем мельче дендриты, тем мельче образующиеся поры.

Если при кристаллизации из металла не выделяются газы, то усадочная пора формируется в условиях вакуума. Если же металл содержит значительное количество растворенных газов, то их атомы проникают в усадочные поры, повышая в них давление. Реальная пористость всегда имеет смешанный газосадочный характер (рис. 5.13).

Реальные сплавы кристаллизуются в определенном интервале температур. Интервал кристаллизации определяет склонность сплава к последовательной кристаллизации (узкоинтервальные сплавы) или к объемной кристаллизации (широкоинтервальные сплавы). Характер кристаллизации сплава определяет склонность сплава к усадке в виде концентрированной раковины или пористости.

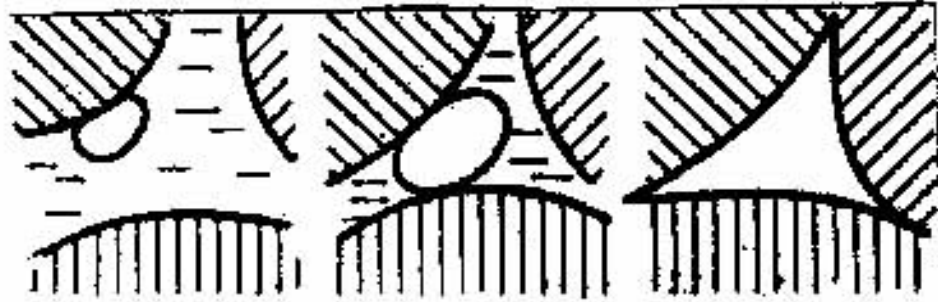


Рис. 5.13. Схема формирования газосадочной поры

Схема связи развития усадочных пустот с диаграммой состояния двойной системы сплавов (рис. 5.14) была построена впервые академиком А.А. Бочваром на основе обобщения экспериментальных исследований. В чистых металлах и эвтектиках (составы 1 и 4) формируются полноценные раковины и пористость почти не имеет развития. При увеличении интервала кристаллизации (составы 2 и 3) существенная часть усадочных пустот представлена порами. Пористость получает максимальное, а усадочная раковина минимальное развитие для сплава 3, соответствующего концентрации в точке пересечения линии температур на границе выливаемости и эвтектической платформы.

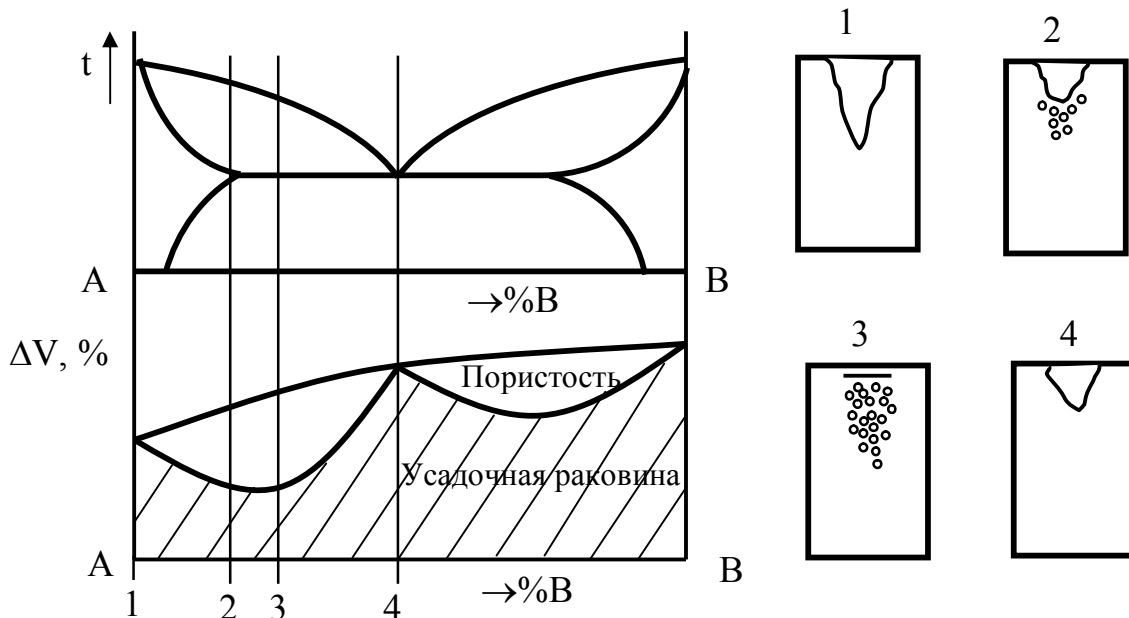


Рис. 5.14. Связь развития усадочных пустот с диаграммой состояния

Относительная величина усадочной раковины отличается у разных сплавов. Очень широки интервалы значений и для сплавов одного типа. Так, например, объем усадочной раковины у стали составляет от 3 до 10 % начального объема расплава, у серого чугуна 1,5...2,5 %, у белого чугуна – 2,5...6,0 %. Большой разброс этих значений связан со сложностью процесса, который зависит от следующих факторов:

1) материал отливки (разное содержание газов; у чугунов весьма различный ход графитизации; разная температура заливки; различные теплофизические свойства);

2) форма (податливость под давлением сплава, расширение формы, ее прочность и теплофизические свойства), определенную роль играет техника формовки и заливки;

3) конструкция отливки (стойкость к деформации – жесткость или податливость).

Приведенные три основных фактора проявляют себя одновременно, и их влияние алгебраически складывается.

При определенных обстоятельствах получается малая, при других – большая усадочная раковина. Предотвратить образование усадочных раковин невозможно, но в наших силах так управлять температурным и силовым полями отливки, чтобы усадочные раковины получались только в прибылях.

У ряда сплавов усадке предшествует предусадочное расширение (рис. 5.15), связанное с увеличением объема при затвердевании (например, при кристаллизации серого чугуна), интенсивным выделением газов, расширением первоначально образовавшейся переохлажденной оболочки отливки и др. Величина расширения обычно не превосходит 0,05...0,30 %. С помощью специальных приборов, фиксирующих изменение длины охлаждающегося образца, можно получить кривую протекания линейной усадки во времени. На кривой линейной усадки (рис. 5.15) находят отражение также фазовые превращения в твердом металле, идущие с изменением объема.

Усадочные процессы в отливках вызваны изменением объема жидкого, затвердевающего и твердого металла, обуславливающим образование усадочных пустот, изменение наружных размеров, развитие деформаций и остаточных напряжений, появление трещин. По этой причине весьма важно понимать механизм возникновения того или иного вида дефектов и возможные меры борьбы с ними.

После заливки металла в форму при температуре $t_{зал}$ начинается его охлаждение в жидком состоянии, сопровождающееся изменением объема (рис. 5.16).

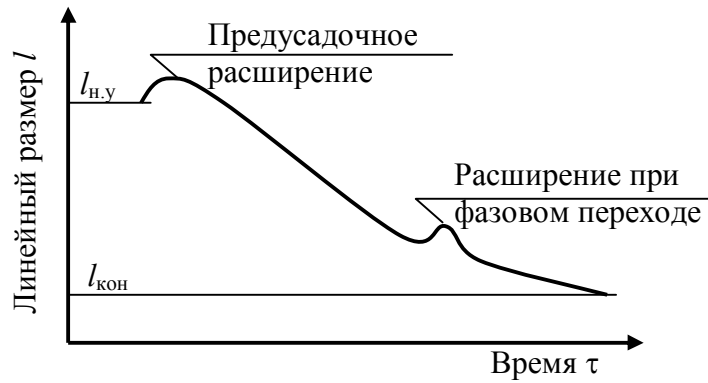


Рис. 5.15. Типовая кривая линейной усадки:
 $l_{н.у}$ – размер при комнатной температуре;
 $l_{кон}$ – изменение объема при охлаждении от температуры заливки до температуры ликвидус

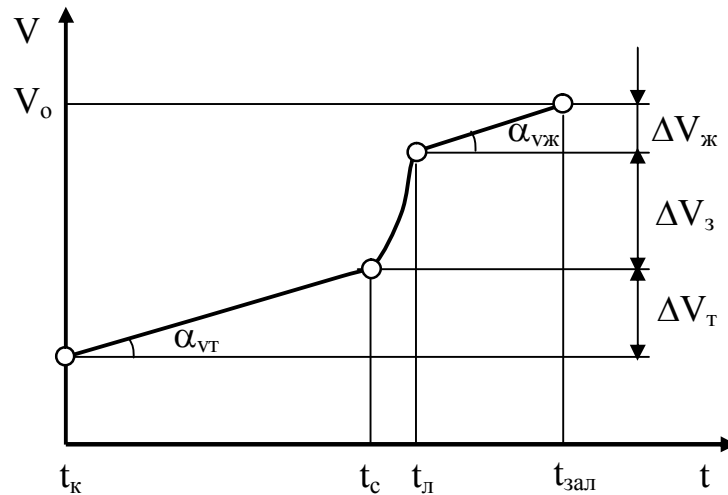


Рис. 5.16. Изменение объема металла при понижении температуры

По достижении температуры ликвидуса относительная величина усадки жидкого металла $\epsilon_{vж}$ составит

$$\epsilon_{vж} = \frac{\Delta V_{ж}}{V_0} = \alpha_{vж} (t_{зал} - t_l), \quad (5.1)$$

где V_0 – объем металла при температуре заливки $t_{зал}$; ΔV_0 – изменение объема при охлаждении от температуры заливки $t_{зал}$ до температуры ликвидус t_l ; $\alpha_{vж}$ – коэффициент объемной усадки в жидком состоянии.

Чем больше перегрев металла при заливке $\Delta t_{пер} = t_{зал} - t_l$, тем больше сокращение объема металла в жидком состоянии, вызывающее понижение уровня расплава. Для различных сплавов $\alpha_{vж}$ составляет 1...4 % на 100 °С

перегрева, то есть является величиной, дающей существенный вклад в общую величину объемной усадки.

В температурном интервале кристаллизации $\Delta t_{\text{инт}} = t_{\text{л}} - t_{\text{с}}$ совместно протекают три вида объемной усадки:

- усадка жидкого металла $\Delta V_{\text{ж}} \cong \alpha_{\text{вж}} \frac{V_0 + 0}{2} \Delta t_{\text{инт}}$, объем которого непрерывно сокращается от V_0 до нуля;
- усадка металла при фазовом переходе из жидкого состояния в твердое $\Delta V_{\text{ф}} = \varepsilon_{\text{вф}} V_0$ с удельным сокращением объема $\varepsilon_{\text{вф}}$;
- усадка твердого металла $\Delta V_{\text{т}} \cong \alpha_{\text{вт}} \frac{0 + V_0}{2} \Delta t_{\text{инт}}$, объем которого при кристаллизации возрастает от нуля до V_0 , с коэффициентом объемной усадки в твердом состоянии $\alpha_{\text{вт}}$.

Общая относительная величина усадки при затвердевании равна

$$\varepsilon_{\text{вз}} = \frac{\Delta V_{\text{з}}}{V_0} = \frac{\Delta V_{\text{ж}} + \Delta V_{\text{ф}} + \Delta V_{\text{т}}}{V_0} = \frac{\alpha_{\text{вж}} + \alpha_{\text{вт}}}{2} \Delta t_{\text{инт}} + \varepsilon_{\text{вф}}, \quad (5.2)$$

где $\Delta V_{\text{ф}}$ – изменение объема при фазовом переходе.

Как следует из (5.2), усадка при затвердевании широкоинтервальных сплавов существенно больше, чем в чистых металлах и эвтектических сплавах, где $\varepsilon_{\text{вз}} = \varepsilon_{\text{вф}}$. При многофазной кристаллизации сплавов эвтектических и перитектических систем величина $\varepsilon_{\text{вф}}$ является взвешенной суммой коэффициентов усадки для различных фаз, выделяющихся при переходе из жидкого состояния в твердое, и зависит от соотношения объемов этих фаз. Например, при затвердевании эвтектического чугуна в зависимости от интенсивности теплоотвода может кристаллизоваться белый чугун, состоящий из ледебурита (эвтектическая смесь аустенита и цементита), или серый чугун, содержащий аустенитно-графитную эвтектику, в которой удельный объем аустенита меньше, чем у расплава ($\varepsilon_{\text{вф}} > 0$), а графита – больше ($\varepsilon_{\text{вф}} < 0$). В чугунах разного состава $\varepsilon_{\text{вз}}$ изменяется в зависимости от степени графитизации от минус 1,5 до плюс 3,0 %.

При охлаждении твердого металла от солидуса $t_{\text{с}}$ до конечной температуры $t_{\text{к}}$ происходит изменение объема $\Delta V_{\text{т}}$ (см. рис. 5.16), которое вызывает сокращение наружных размеров отливки и при отсутствии структурных и фазовых превращений описывается выражением

$$\varepsilon_{\text{вт}} = \frac{\Delta V_{\text{т}}}{V_0} = \alpha_{\text{вт}} (t_{\text{с}} - t_{\text{к}}). \quad (5.3)$$

Коэффициент объемной усадки в твердом состоянии $\alpha_{\text{вт}}$ равен утроенной величине коэффициента линейной усадки $\alpha_{\text{т}}$ ($\alpha_{\text{вт}} \approx 3\alpha_{\text{т}}$). Для тугоплавких сплавов $\varepsilon_{\text{вт}}$ достигает особенно значительной величины вследствие

широкого интервала температур усадки (соответственно и линейная усадка, например, у стали больше, чем у чугуна, что предопределяет большую опасность напряжений, коробления и трещин в стальных отливках).

Из общей величины объемной усадки $\varepsilon_v = \varepsilon_{vж} + \varepsilon_{vз} + \varepsilon_{vt}$ основную долю (50...60 %) составляет усадка в твердом состоянии, усадка при затвердевании дает вклад 30...45 %. Приведенные данные показывают, насколько значительными могут быть последствия усадочных процессов в отливках, если ими не управлять для предотвращения образования дефектов. Например, известно, что наличие в стали 1...2 % пористости вызывает падение ее пластических свойств (ударной вязкости и относительного сужения) практически до нуля. Остаточные напряжения в отливках могут достигать в неблагоприятных условиях 70...80 % предела прочности и вызывать внезапное образование трещин при весьма малых эксплуатационных нагрузках.

5.1.5. Питание отливок при усадке и расчет прибылей

Основным технологическим средством устранения усадочной раковины из литой заготовки является прибыль. Прибыль представляет собой технологический элемент, в котором должна быть сосредоточена область усадочной раковины и который отделяется от отливки в процессе обработки. При формировании отливки прибыль составляет с нею единое целое. Кроме сосредоточения усадочной раковины, прибыль является средством ослабления развития зональной пористости и сборником загрязнений, всплывающих из жидкого металла в процессе затвердевания.

Сложная отливка, состоящая из элементов различной толщины, при затвердевании обычно разделяется на несколько обособленных узлов питания. Образование усадочных раковин в каждом узле питания можно компенсировать за счет одного источника питания (рис. 5.17, а).

Процесс питания отливки должен быть организован таким образом, чтобы в каждом ее узле действовал принцип направленного затвердевания от тонких элементов к толстым и, наконец, к прибыли. Проверка выполнения этого принципа осуществляется методом выкатывания шарика. В самый тонкий элемент узла мысленно помещается шарик (рис. 5.17, б), который при переходе в каждый новый верхний элемент расширяется (сжиматься он не может). Если он беспрепятственно выкатывается в прибыль, значит принцип направленного затвердевания выполнен.

Прибыли классифицируются по расположению относительно узла питания отливки, по способу формовки (рис. 5.18, а) и по конфигурации (рис. 5.18, б).

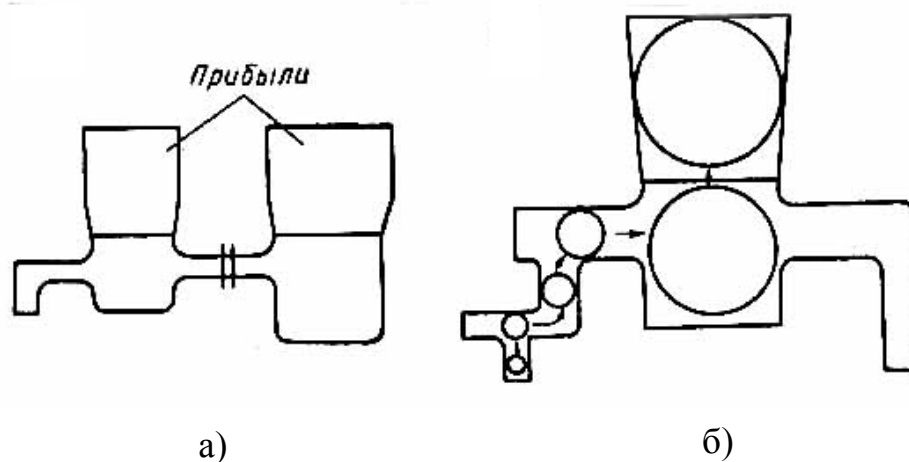


Рис. 5.17. Разделение отливки на узлы питания (а) и метод выкатывания шарика (б)

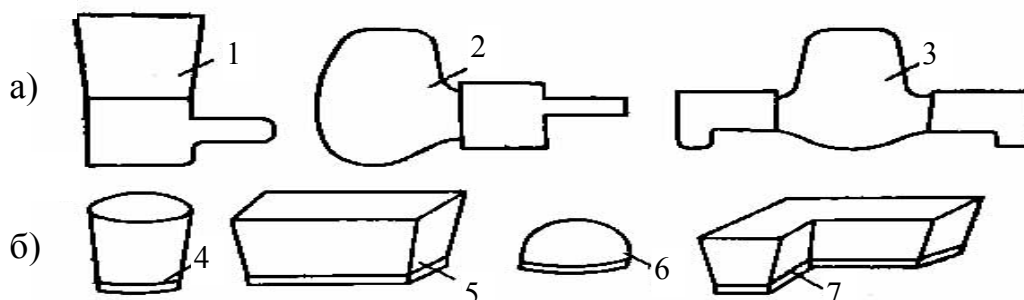


Рис. 5.18. Классификация прибылей

По расположению относительно узла питания прибыли делятся на прямые или верхние 1; отводные или боковые 2; в том числе групповые 3, питающие несколько отливок. По способу формовки прибыли делятся на открытые 1 и закрытые 2. По конфигурации – на цилиндрические 4, плоские 5, сферические 6 и фигурные 7.

Регулирование работы прибыли производится тепловыми и механическими методами. Для стали расход металла на прибыли составляет от 15 (для слитков) до 100 % (для фасонных отливок) от массы литой заготовки. В то же время объем усадочной раковины, для ликвидации которой прибыли предназначены, не превосходит 4 %. Остальной металл требуется для поддержания источника питания в виде бассейна жидкого металла до конца затвердевания отливки. Любое сокращение скорости охлаждения металла в прибыли должно позволить соответственно уменьшить ее объем.

Теплоизоляция прибыли осуществляется, прежде всего, путем засыпки зеркала жидкого металла теплоизолирующими порошками. В простейшем случае это сухой песок; в других случаях – малотеплопроводные смеси (отходы производства слюды, вермикулит и др).

Большой эффект дает одновременное оформление боковой поверхности прибыли теплоизолирующим огнеупорным материалом. При литье в песчаные формы это достигается путем заключения прибылей в стаканы из пеношамота, перлита или другого материала. При литье в металлические формы прибыли всегда оформляют стержнями.

Еще более эффективным средством, чем теплоизоляция является обогрев прибылей. Наиболее доступным и экономически целесообразным для отливок оказался метод засыпки их разогревающими или экзотермическими смесями.

На стальных отливках применяют два типичных состава экзотермических смесей (табл. 5.1).

Таблица 5.1

Составы экзотермических смесей

Материал	Диаметр прибыли, мм	
	100	150...300
Алюминий в порошке	18	17
Окалина или железная руда	57	46
Соль (KNO ₃)	–	10
Шлак или зола	–	12
Глина	–	5
Цемент	25	10

Под действием теплоты заливаемого металла алюминиевый порошок взаимодействует с окисью железа с выделением большого количества теплоты по реакции



Образующийся при сгорании смеси шлак покрывает прибыль хорошо теплоизолирующей коркой.

Перетекание металла из прибыли в отливку происходит под действием двух сил: гидростатического напора и атмосферного давления. Атмосферное давление оказывает большое влияние на процессы питания.

В случаях, когда отливка имеет развитые плоские поверхности и закрытую прибыль, в начальной стадии затвердевания поверхностная корка может полностью изолировать внутреннюю часть отливки (рис. 5.19). За счет выделения газов из формовочной смеси под действием этого давления в форме возникает давление, равное или несколько большее атмосферного;

корка на плоских поверхностях прогибается как мембрана. В результате уровень металла в прибыли не опускается, а внутри отливки создается вакуум. При утолщении и охлаждении поверхностной корки она становится жесткой и перестает прогибаться.

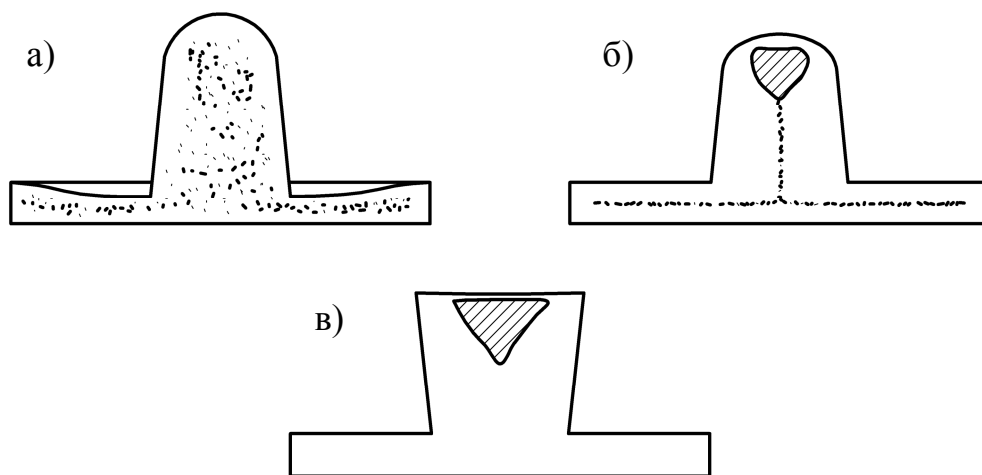


Рис. 5.19. Влияние атмосферного давления на работу прибыли:
а – закрытая прибыль (атмосферное давление не проникло);
б – закрытая прибыль (атмосферное давление проникло); в – открытая прибыль

Усадочная раковина получается в этом случае недоразвитой, а пористость проникает в тело отливки даже при больших размерах прибыли. Это определяется недостаточностью гидростатического давления металла для нормального развития процесса питания при отсутствии воздействия атмосферного давления.

Для предотвращения указанных явлений необходимо принять меры для обеспечения проникновения атмосферного давления в полость усадочной раковины. В открытых прибылях это происходит само собой. Для закрытых прибылей обычно достаточно предусматривать на верхней поверхности плоскую площадку, которая легко прорывается под действием внешнего давления. Если верхняя часть прибыли имеет сферическую форму, она обладает устойчивостью и может изолировать усадочную раковину.

На работу прибыли и формирование усадочной раковины оказывает влияние вибрация. Под ее воздействием область усадочной раковины приобретает форму блюдечка, ее глубина уменьшается и размер прибыли, в принципе, может быть уменьшен.

При выборе места установки прибыли целесообразно отдавать предпочтение верхним поверхностям. Прибыль должна устанавливаться на наиболее массивном элементе каждого крупного узла питания. Присоединять отводные прибыли к боковым поверхностям отливки целесообразно

только в тех случаях, когда они используются как групповые или когда установка верхней прибыли усложнит механическую обработку литой заготовки.

Поскольку прибыли ослабляют осевую пористость на отливках большой протяженности, даже постоянной толщины стенок, их устанавливают по несколько штук. Район воздействия прибыли на осевую пористость ограничен; она устраняется полностью лишь на расстоянии 1,5...2 толщин стенки отливки. Некоторое ослабление пористости наблюдается на расстоянии до 5...7 толщин. На большее расстояние в стенке постоянной толщины прибыль влияния не оказывает. Можно рекомендовать следующие максимальные расстояния между прибылями при установке их на стальных отливках с постоянной толщиной стенок:

Толщина стенок отливки, мм	20	40	60
Максимальное расстояние между прибылями, мм	200...300	300...400	400...600

При выборе типа необходимо отдавать предпочтение прямым цилиндрическим закрытым прибылям.

Помимо экономичности и обеспечения лучших условий питания они обладают следующими преимуществами: для цилиндрических прибылей проще и дешевле изготовление моделей; закрытые прибыли упрощают формовку, препятствуют окислению металла при заливке, способствуют сокращению их необходимого объема за счет теплоизоляции сверху, обеспечивают постоянство объема прибыли.

Открытые прибыли целесообразно применять при изготовлении крупных отливок, когда можно осуществить доливку в них свежих порций металла для улучшения питания или применить теплоизолирующие засыпки.

Расчитать прибыли – значит определить их количество и основные геометрические размеры для получения годной отливки.

На первом этапе определяется количество и объем горячих узлов питания. Узлами питания называются отдельные массивные части литого изделия, в которых следует ожидать образование усадочных дефектов.

В объеме узла питания заключается как массивная часть, на которую непосредственно устанавливается прибыль, так и часть более тонких прилегающих элементов, которая питается от прибыли через массивную часть. В отдельных случаях вся отливка целиком может представлять собой единый узел питания. Объем узлов питания рассчитывается по размерам чертежа.

На втором этапе определяется количество прибылей. Их должно быть установлено столько, сколько горячих узлов питания в отливке. При большой протяженности узла питания в горизонтальном направлении лучшее питание обеспечивается сплошной одной прибылью длиной, равной длине питаемого участка. Однако, в целях экономии металла и облегчения обрез-

ки прибыли от отливки устанавливают несколько разобренных прибылей. При этом количество прибылей должно быть таким, чтобы металл между прибылями или между прибылью и краем отливки не имел пористости. Это достигается в том случае, если температурный градиент по длине зоны между прибылями или между прибылью и краем отливки $\frac{dT}{dx} \neq 0$. Если $\frac{dT}{dx} = 0$, то в отливке образуется непитаемая зона (рис. 5.20).

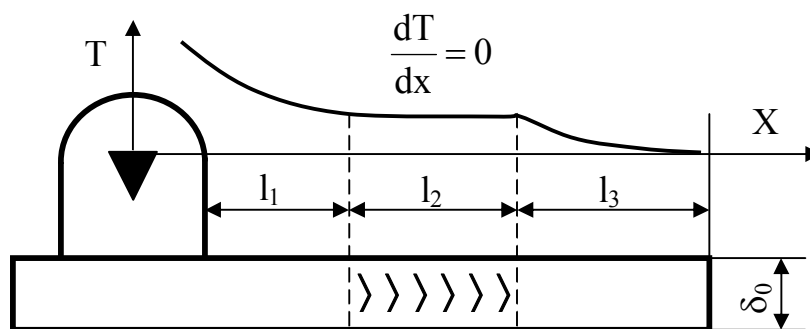


Рис. 5.20. Расположение зон плотного строения и непитаемой зоны отливки:

l_1 – зона плотного строения, протяженность которой зависит от радиуса действия прибыли, $l_1 = r_n \delta_0$;

l_2 – зона расположения осевой усадочной пористости (непитаемая зона);

l_3 – зона плотного строения, протяженность которой зависит от радиуса действия края отливки, $l_3 = r_k \delta_0$

На общую протяженность зоны плотного строения отливки L_n , представляющую собой сумму двух радиусов действия прибыли (расстояние между двумя прибылями) или сумму радиуса действия прибыли и края отливки ($L_n = 2r_n$ или $L_n = r_n + r_k$), влияют многочисленные факторы: схема подвода металла (непосредственно под прибыль или с противоположной стороны), температура заливки, состав сплава, условия затвердевания отливки (регулирование затвердевания за счет холодильников), положения отливки при заливке (см. табл. 5.2 и 5.3).

Часто отливки типа плит заливаются в вертикальном положении. Поэтому протяженность зон сплошности металла между прибылями и между прибылью и краем отливки будет изменяться.

Распространение получили два основных метода расчета прибылей:

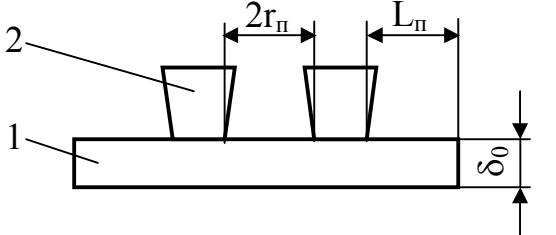
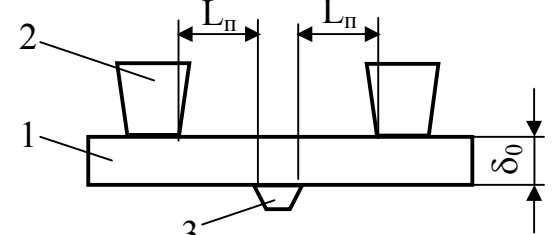
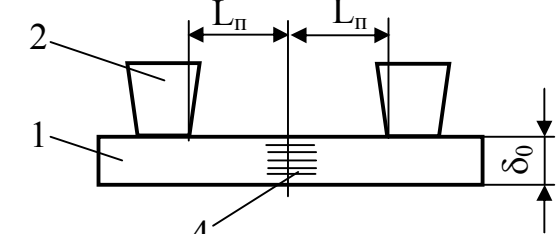
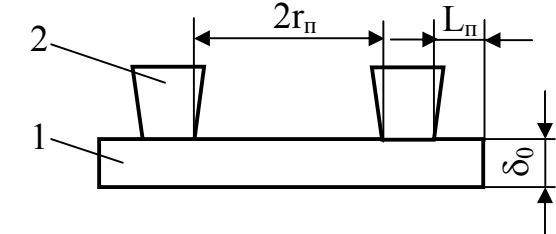
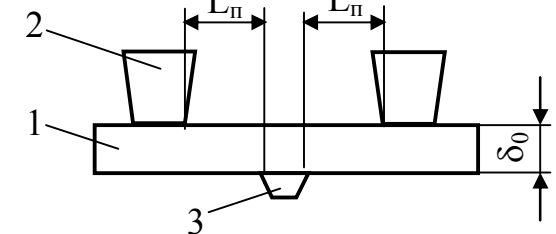
- метод П.Ф. Василевского;
- метод И. Пржибыла.

Метод П.Ф. Василевского пригоден для определения размеров прибыли отливок из углеродистых и малолегированных сталей.

Отливка условно делится на самостоятельные узлы. Каждый из указанных узлов или отливка в целом приводятся к одной из двух типовых схем питания (рис. 5.21 и 5.22).

Таблица 5.2

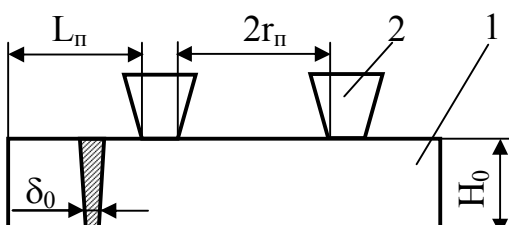
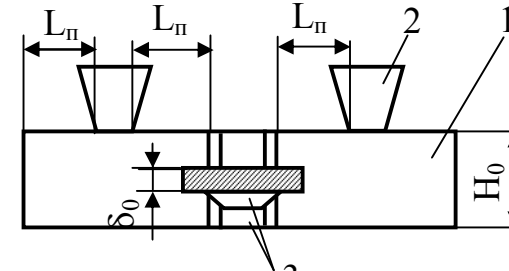
Результирующие данные по $L_{\text{п}}$ и $2r_{\text{п}}$ стенок деталей
из углеродистых сталей, отливаемых в горизонтальном положении

Схема расположения прибылей*	Подвод металла	
	под прибыль	с противоположной стороны
Отливка типа плиты		
	$L_{\text{п}} = (4,5 \dots 6,5)\delta_0$ $2r_{\text{п}} = (4 \dots 6)\delta_0$	$L_{\text{п}} = (4,0 \dots 4,5)\delta_0$ $2r_{\text{п}} = (3,5 \dots 4,5)\delta_0$
	$L_{\text{п}} = (4 \dots 5)\delta_0$	$L_{\text{п}} = (3 \dots 4)\delta_0$
	$L_{\text{п}} = (4,5 \dots 6,5)\delta_0$	$L_{\text{п}} = (4,0 \dots 4,5)\delta_0$
Отливка типа бруса		
	$L_{\text{п}} = 44\sqrt{\delta_0}$ $2r_{\text{п}} \leq 2,8\delta_0$	$L_{\text{п}} = 28\sqrt{\delta_0}$ $2r_{\text{п}} \leq 2\delta_0$
	$L_{\text{п}} = 30\sqrt{\delta_0}$	

* Позиции на эскизах: 1 – отливка; 2 – прибыль; 3 – наружный холодильник; 4 – внутренний холодильник

Таблица 5.3

Результатирующие данные по протяженности зоны сплошности стенок деталей типа плит, отливаемых из углеродистой стали в вертикальном положении

Схема расположения прибылей*	Отношение $\frac{H_0}{\delta_0}$	Протяженность зоны плотного металла при подводе питателей	
		под прибыль	с противоположной стороны прибыли
 <p>Формовочный уклон ~ 1 : 100</p>	2...7	$2r_{п} \leq 3\delta_0$	$2r_{п} \leq 2,5\delta_0$
	1...2	$2r_{п} \leq 2,5\delta_0$	$2r_{п} \leq 2,0\delta_0$
	2...7	$L_{п} \leq 5\delta_0$	$L_{п} \leq 4,5\delta_0$
	1...2	$L_{п} \leq 4,5\delta_0$	$L_{п} \leq 4,0\delta_0$

* Позиции на эскизах: 1 – отливка; 2 – прибыль; 3 – наружный холодильник

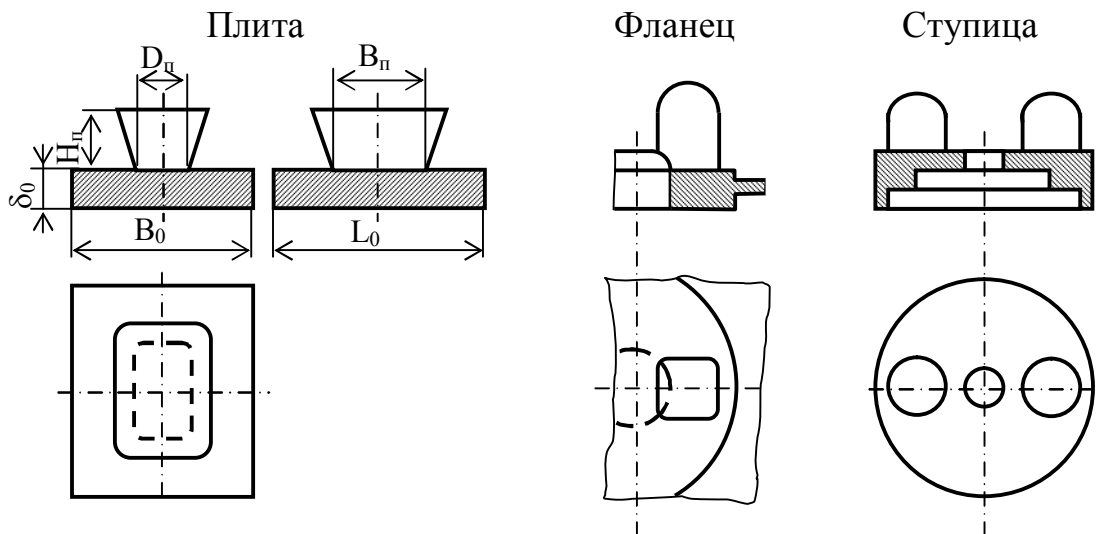


Рис. 5.21. Первая типовая схема питания отливок и примеры расположения прибылей

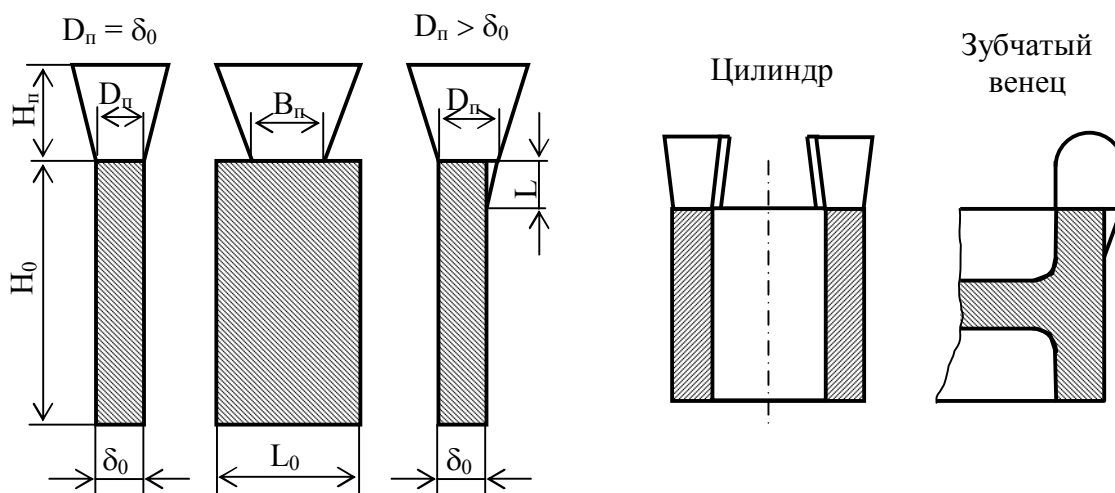


Рис. 5.22. Вторая типовая схема питания отливок и примеры расположения прибылей

Затем определяется поперечный размер питаемой стенки δ_0 или диаметр окружности, вписанный в питаемый узел, а при второй типовой схеме подсчитывается отношение высоты отливки к поперечному размеру питаемой стенки H_0 / δ_0 . По табл. 5.4 и 5.5 для близких значений δ_0 и H_0 / δ_0 выбираются соответствующие отношения $D_п / \delta_0$ и $H_п / D_п$.

Таблица 5.4
Ориентировочные соотношения основных параметров отливки и прибыли (см. рис. 5.21)

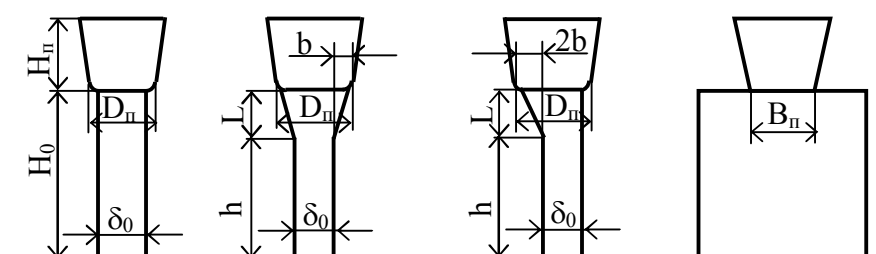
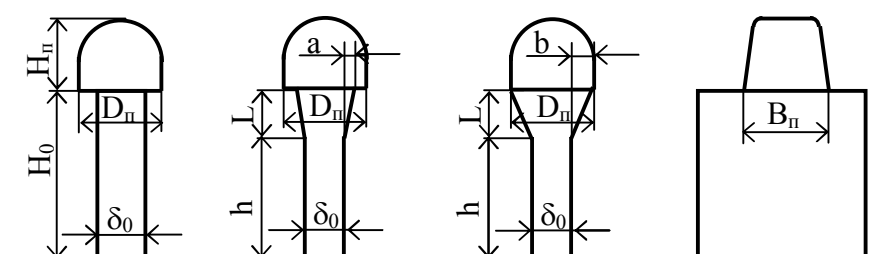
δ_0 , мм	$H_п / D_п$			Тип прибыли	Доливка прибыли через каналы дополнительной литниковой системы
	1	1,2...1,25	1,5		
	$D_п / \delta_0$				
50...120	2,4...2,6	2,3...2,5	2,2...2,3	Закрытая	—
120...200	2,2...2,5	2,1...2,4	2,0...2,3	Закрытая	Необходима
				Открытая	Необходима
200...500	2,1...2,3	2,0...2,3	1,9...2,2	Открытая	Необходима

Примечания: 1. Приведенные соотношения можно применять только для отливок, изготовленных из углеродистой и низколегированной сталей.

2. При устройстве прибылей шаровой формы принимают $H_п : D_п = 1$.

Таблица 5.5

Ориентировочные соотношения основных параметров отливки и прибыли (см. рис. 5.22)

Исполнение I				Исполнение II					
									
δ ₀ , мм	H ₀ / δ ₀	D _н / δ ₀		H _н / D _н		a	B, не менее	L	h, не более
		Исполнение I	Исполнение II	Исполнение I	Исполнение II				
60	3	1,3...1,8	1,6...2,1	1,2...1,3	1,1...1,2	4	4	50	H ₀ ...50
	5	1,4...1,9	1,7...2,2	1,2...1,4	1,1...1,3	5	5	50	H ₀ ...50
	8	1,5...2,0	1,8...2,3	1,2...1,5	1,2...1,5	10	10	H ₀ ...6δ ₀	6δ ₀
100	3	1,2...1,6	1,5...2,0	1,2...1,3	1,1...1,2	5	5	60	H ₀ ...60
	5	1,3...1,7	1,6...2,1	1,2...1,4	1,1...1,3	5	5	60	H ₀ ...60
	8	1,4...1,8	1,8...2,3	1,2...1,5	1,2...1,5	15	15	H ₀ ...6δ ₀	6δ ₀
200	3	1,2...1,4	1,4...1,9	1,1...1,3	1,0...1,2	5	5	60	H ₀ ...60
	5	1,3...1,4	1,5...2,0	1,2...1,5	1,1...1,4	5	5	60	H ₀ ...60
	8	1,3...1,5	—	—	—	—	—	—	6δ ₀
300	3	1,2...1,4	1,4...1,8	1,2...1,4	1,1...1,5	6	6	60	H ₀ ...60
	5	1,2...1,5	—	—	—	—	6	—	H ₀ ...60
	8	1,2...1,5	—	—	—	—	15	—	6δ ₀

Примечания: 1. Приведенные соотношения применяются только для отливок, изготовляемых из углеродистой и низколегированной стали.

2. Нижние пределы отношений D_н / δ₀ относятся к случаям доливки металла в прибыль после окончания заливки форм.

3. Относительная протяженность прибылей определяется по радиусам действия прибыли и края отливки (см. табл. 5.2 и 5.3).

Расчет прибылей по методу И. Пржибыла применим для многих литейных сплавов. Более надежные результаты он дает в случае образования концентрированных усадочных раковин, например, при изготовлении отливок из стали, высокопрочного чугуна и т.д. Объем прибыли V_{Π} определяется по уравнению

$$V_{\Pi} = \frac{\beta \varepsilon_v}{1 - \beta \varepsilon_v} V_y, \text{ м}^3, \quad (5.4)$$

где β – отношение объема прибыли к объему усадочной раковины (V_{Π}/V_p); ε_v – часть объемной усадки сплава, принимающая участие в формировании усадочной раковины; V_y – объем питаемого узла отливки, м^3 .

Для определения V_{Π} по данному уравнению необходимо выделить в отливке узлы питания и рассчитать объем V_y каждого из них.

Величина ε_v зависит от типа сплава: для алюминиевых $\varepsilon_v = 0,043 \dots 0,055$; для магниевых $\varepsilon_v = 0,040 \dots 0,045$; для цинковых $\varepsilon_v = 0,045 \dots 0,050$; для латуней $\varepsilon_v = 0,061 \dots 0,065$; для безоловянных бронз $\varepsilon_v = 0,08$, для оловянных бронз $\varepsilon_v = 0,045 \dots 0,050$, для сталей и высокопрочного чугуна $\varepsilon_v = 0,045$.

Коэффициент β выбирается из условия работы прибыли:

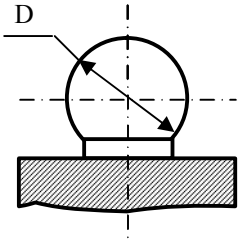
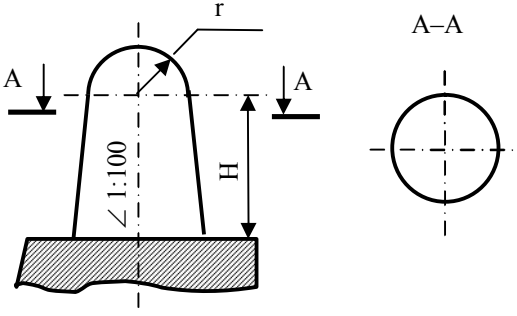
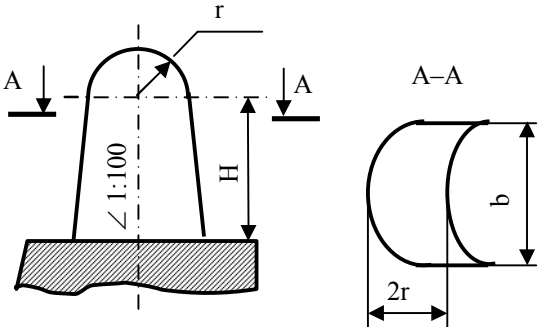
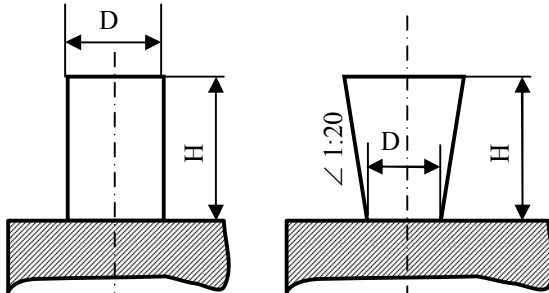
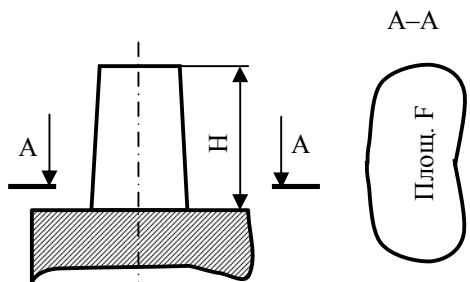
- для прибылей, где рабочее давление ниже атмосферного $\beta = 11 \dots 12$;
- для прибылей с атмосферным давлением в усадочной раковине $\beta = 9 \dots 10$;
- для теплоизолированных прибылей $\beta = 8 \dots 9$;
- для обогреваемых прибылей $\beta = 6 \dots 7$.

Из найденного объема V_{Π} рассчитываются размеры прибыли. При этом отношение высоты прибыли к ее диаметру $H_{\Pi} : D_{\Pi}$ на отливках ориентировочно должно быть равно 1,25...1,50 для закрытых и 1,50...1,90 для открытых прибылей. Расчетные формулы для определения конструктивных параметров прибылей различных конфигураций приведены в табл. 5.6.

После определения конструктивных размеров прибыли прогнозируется эффективность работы прибылей и определяется технологический выход годного. Для этого рассчитывается R_{Π} и сравнивается с R_y (R – приведенная толщина прибыли или теплового узла, равная отношению объема к поверхности охлаждения: $R = V/F$). Для сплавов, заливаемых без перегрева, R_{Π} / R_y должно быть не менее 1,03.

Таблица 5.6

Определение высоты типовых конструкций прибылей

Вид прибыли	Характеристика	Расчётная формула
	Шаровая прибыль	$D = 1,24\sqrt[3]{V_{\Pi}}$
	Закрытая куполообразная цилиндрическая прибыль	$H = \frac{V_{\Pi}}{\pi r^2} - \frac{2}{3}r$ <p>$H + r$ не менее вы- соты питаемого узла</p>
	Закрытая куполообразная прибыль с компактной формой горизонтального сечения	$H = \frac{V_{\Pi} - 0,45\pi r^2 b}{F}$ <p>$H + r$ не менее вы- соты питаемого узла</p>
	Открытая цилиндрическая или коническая прибыль	$H = \frac{4V_{\Pi}}{\pi D^2}$
	Открытая при- быль с компак- тной формой го- ризонтального сечения	$H = \frac{V_{\Pi}}{0,95F}$

Приближенный технологический выход годного (ТВГ) определяется по формуле

$$\text{ТВГ} = \frac{V_0}{V_0 + V_{\text{П}} - V_{\text{Р}}} \cdot 100 = \frac{V_0}{(1 - \varepsilon_v)(V_0 + V_{\text{П}})} \cdot 100, \% \quad (5.5)$$

где V_0 – объем отливки, м^3 ; $V_{\text{Р}}$ – объем усадочной раковины, м^3 .

Полученный ТВГ сравнивается с нормируемым для подобных отливок. В большинстве случаев при литье цветных сплавов в песчано-глинистые формы эта величина составляет 45...70 %, данные для стальных отливок приведены в табл. 5.7. При заниженных значениях ТВГ принимается решение об использовании какого-либо способа повышения эффективности работы прибылей.

Таблица 5.7

Ориентировочный технологический выход годного для отливок, изготавливаемых из углеродистых и низколегированных сталей

Группа	Наименование	Масса отливки, кг	Преобладающая толщина стенок отливки δ_0 , мм	Технологический выход годного, %	
				Прибыли открытые	Прибыли закрытые полушаровые
I	Мелкие отливки – ответственного назначения	До 100	До 20	54...62	59...67
			20...50	53...60	58...65
	– особо ответственного назначения	До 100	Св. 50	52...58	57...63
			До 20	52...58	57...63
II	Средние отливки – ответственного назначения	100...500	20...50	51...57	56...62
			Св. 50	50...56	55...61
	– особо ответственного назначения	100...500	До 30	56...64	61...69
			30...60	54...62	59...67
III	Крупные отливки – ответственного назначения	500...5000	Св. 60	52...60	57...65
			До 30	54...62	59...67
	– особо ответственного назначения	500...5000	30...60	53...60	58...65
			Св. 60	50...58	55...63
III	Крупные отливки – ответственного назначения	500...5000	До 50	57...65	62...70
			50...100	55...63	60...68
	– особо ответственного назначения	500...5000	Св. 100	53...61	58...66
			До 50	55...63	60...68
			50...100	53...61	58...66
			Св. 100	51...69	56...64

5.1.6. Напряжения и развитие трещин в отливках

В процессе формирования и охлаждения до температуры окружающей среды в отливке возникает сложное напряженное состояние. По физической природе различают напряжения I рода – зональные напряжения, возникающие в макрообъемах с градиентом по всей отливке или отдельным ее частям; напряжения II рода – в пределах микрзерна или группы зерен; напряжения III рода – в субмикроскопических областях, в пределах кристаллической решетки.

По источнику происхождения напряжения подразделяют на усадочные – возникающие в результате сопротивления усадке металла со стороны формы и стержней; термические – возникающие за счет градиента температур по сечению отливки и неравномерного или неодновременного сжатия (расширения) отдельных частей отливки, слоев структурных зон; фазовые – возникающие в результате различия удельных объемов фаз при фазовых превращениях. Независимо от источника происхождения все эти напряжения алгебраически складываются, и их результирующее воздействие зависит от соотношения суммарного напряжения и механических свойств сплава.

Усадочные напряжения всегда растягивающие. Их величина зависит от сопротивления формы и стержней. По размерам области уравнивания – это в основном напряжения I рода. При высоких температурах происходит релаксация усадочных напряжений вследствие пластической деформации. С переходом сплава в упругое состояние напряжения накапливаются и достигают максимума к моменту выбивки отливки из формы. После выбивки напряжения частично снимаются.

Механическое торможение усадки возникает в отливках, имеющих внутренние полости и выступающие части (рис. 5.23), так как сокращение наружных размеров отливок встречает сопротивление формы. В зависимости от материала формы (песчаная смесь, металлический кокиль и т.д.) это сопротивление приблизительно характеризуют коэффициентом жесткости μ : для абсолютно податливых форм $\mu = 0$, для абсолютно жестких $\mu = 1$, в общем случае $0 < \mu < 1$.

Способность формы к деформированию под влиянием усилий, развиваемых отливкой при усадке, обратная ее жесткости, определяет действительную усадку отливки $\varepsilon_{отл}$ в отличие от свободной усадки $\varepsilon_{св}$, которую можно получить только в абсолютно податливой форме:

$$\varepsilon_{отл} = \varepsilon_{св} (1 - \mu). \quad (5.6)$$

Нереализованная усадка металла, подавленная сопротивлением формы, является деформацией отливки:

$$e = \varepsilon_{св} - \varepsilon_{отл} = \mu \varepsilon_{св}. \quad (5.7)$$

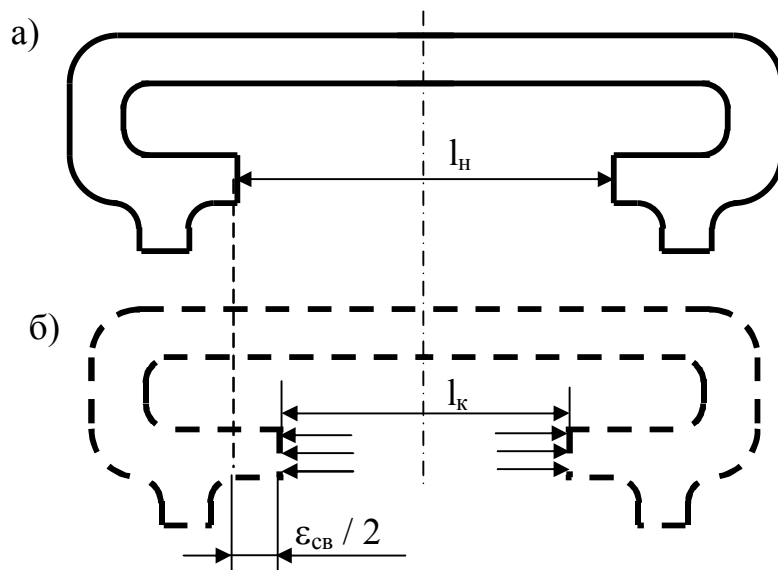


Рис. 5.23. Сопротивление усадке отливки в результате деформации формы на величину $l_H - l_K$

В податливых формах ($\mu \approx 0$) деформация отливки минимальна ($e \approx 0$), в жестких формах ($\mu \approx 1$) деформация численно равна нереализованной (потенциально возможной) свободной усадке $e \approx \epsilon_{CB}$.

В области высоких температур, когда металл находится в пластичном состоянии, деформации, превышающие предельную пластичность материала, вызывают появление трещин, называемых горячими, или кристаллизационными. Это связано с тем, что в температурном интервале кристаллизации $t_L \dots t_C$, когда дендритные кристаллиты частично разделены прослойками жидкой фазы, пластичность металла резко снижается до 0,1...0,5 %; при этом даже незначительное торможение линейной усадки способно вызвать появление деформаций, превышающих пластичность (δ):

$$e = \mu \epsilon_{CB} > \delta, \quad (5.8)$$

и тогда образуется горячая трещина.

В области низких температур, когда металл переходит в упругое состояние, деформации вызванные торможением усадки, способствуют появлению так называемых усадочных напряжений $\sigma_y = eE = \mu \epsilon_{CB}^* E = \alpha_T \mu E (t^* - t)$, где E – модуль упругости, t – текущая температура, ϵ_{CB}^* – потенциальная свободная усадка отливки с момента условного перехода металла из чисто пластического в идеально упругое состояние при температуре t^* . По мере понижения температуры отливки усадочные напряжения $\sigma_y(t)$ нарастают и достигают максимума после полного охлаждения ($t = t_K$):

$$(\sigma_y)_{\max} = \alpha_T \mu E t^*. \quad (5.9)$$

Если величина $\sigma_y(t)$ в какой-то момент превысит предел прочности σ_B , произойдет разрушение и образуется так называемая холодная трещина.

Для уменьшения σ_y в отливках сложной конфигурации, испытывающих значительное механическое торможение усадки, важно не только снижать жесткость формы μ , но также извлекать отливку из формы при такой температуре выбивки t_B , когда σ_y не достигает σ_B , то есть

$$t_B > t^* - \frac{\sigma_B}{\alpha_T \mu E}. \quad (5.10)$$

Очевидно, что усадочные напряжения не возникают, если выбивку производить при $t_B > t^*$, однако при этом могут достигать опасной величины термические напряжения, поэтому необходимо выдерживать отливки в форме до некоторой оптимальной температуры.

Термическое торможение усадки возникает в результате взаимных деформаций при неравномерном охлаждении различных частей отливки сложной конфигурации (рис. 5.24). Массивные и тонкие части отливки затвердевают не одновременно и охлаждаются с различной скоростью, в результате чего между ними возникают перепады температур, величина которых сначала возрастает, достигает максимума, а затем снижается до нуля при полном охлаждении отливки. В зависимости от изменения температуры обе части отливки сокращают свои размеры на величину $(\epsilon_{св})_{1,2} = \alpha_T \Delta t_{1,2}$, где индексы 1 и 2 относятся к тонкой и массивной частям соответственно. Если бы они были не связаны и их усадка не зависела друг от друга, тогда она была бы равна свободной: $(\epsilon_{отл})_{1,2} = (\epsilon_{св})_{1,2}$. В связанной системе более интенсивное сокращение размеров одной части вызывает деформации сжатия в другой и, наоборот, приводит к появлению деформаций растяжения в первой. Эти деформации равны разнице между потенциальной свободной усадкой и действительной усадкой отливки как единого целого:

$$e_{1,2} = (\epsilon_{св})_{1,2} - \epsilon_{отл}. \quad (5.11)$$

В области высоких температур ($t > t^*$) деформации носят пластический характер и не приводят к появлению напряжений ($E \approx 0$), хотя и вызывают снижение свойств металла в результате образования большого числа дислокаций в структуре. После перехода всей отливки в упругое состояние (с момента τ^* на рис. 5.24, а, когда $t_2 < t^*$) возникающие деформации приводят к появлению термических напряжений $(\sigma_T)_{1,2} = E e_{1,2}$. С момента τ^* до полного остывания массивная часть отливки, охлаждаясь от t_2^* , получит большую свободную усадку $(\epsilon_{св})_2 = \alpha_T t_2^*$, чем тонкая $(\epsilon_{св})_1 = \alpha_T t_1$ (рис. 5.24, б), поэтому после полного охлаждения массивная часть будет согласно (5.9) растянута на величину $e_2 = \alpha_T t_2^* - \epsilon_{отл}$, так как усадка отливки за тот же период $\epsilon_{отл} < (\epsilon_{св})_2$. Соответственно, тонкая часть при остывании от более низкой температуры t_1^* будет сжата на величину $-e_1 = \alpha_T t_1^* - \epsilon_{отл}$, так как $\epsilon_{отл} > (\epsilon_{св})_1$. Выражая $\epsilon_{отл}$ через среднюю температуру в момент τ^*

$$\varepsilon_{\text{отл}} = \alpha_{\tau} \frac{t_1^* f_1 + t_2^* f_2}{f_1 + f_2}, \quad (5.12)$$

где f_1, f_2 – сечения тонкого и массивного элементов, получим после несложных преобразований

$$(\sigma_{\tau})_{1,2} = \frac{f_{2,1}}{f_1 + f_2} \alpha_{\tau} E \Delta t^*, \quad (5.13)$$

где $\Delta t^* = t_2^* - t_1^*$ - перепад температур в отливке в момент τ^* .

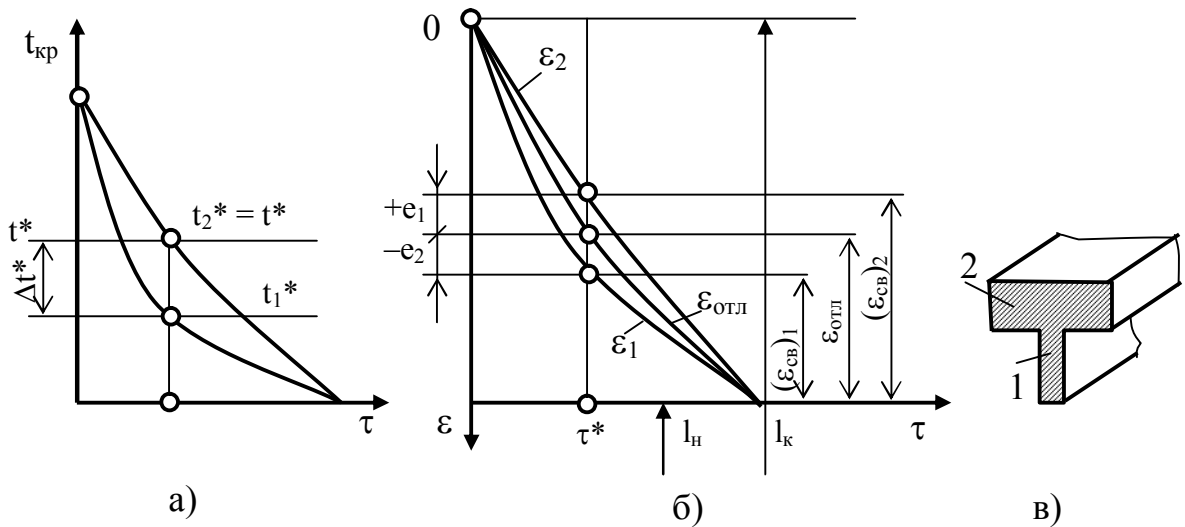


Рис. 5.24. Изменение температуры (а) и усадки (б) тонкого (1) и массивного (2) брусков при охлаждении отливки сложного сечения (в)

Таким образом, термические напряжения возникают в момент условного перехода отливки в упругое состояние, возрастают по мере охлаждения и достигают максимального значения после полного выравнивания температур. Величина σ_{τ} определяется перепадом температур Δt^* , то есть неравномерностью охлаждения различных частей отливки, а распределение напряжений зависит от соотношения площадей их сечения f_1 и f_2 . Отливки из материала с большим модулем упругости E имеют более высокий уровень остаточных напряжений.

Уменьшение теплопроводности сплава увеличивает градиент температур по сечению отливки и, следовательно, уровень напряжений I рода. Очевидно также влияние температурного коэффициента линейного расширения α_{τ} на уровень напряжений I рода. В результате α_{τ} структурных составляющих могут возникать также термические напряжения II рода. Анализ процесса возникновения термических напряжений показывает, что ос-

таточные напряжения не зависят от размеров отливки и пропорциональны различию сечений элементов отливки. При этом в толстых сечениях развиваются растягивающие напряжения, в тонких – сжимающие.

Фазовые напряжения в наибольшей степени зависят от свойств сплава (точнее, от свойств фаз и структурных составляющих). Возникновение и уровень напряжений определяются: 1) различием удельных объемов фаз; 2) упругими и пластическими свойствами матрицы сплава (то есть основной структурной составляющей); 3) последовательностью протекания фазового превращения в объеме отливки (из-за наличия градиента температур фазовые превращения протекают, как правило, не одновременно).

Большое значение имеет температура, при которой происходит фазовое превращение, так как с повышением температуры свойства матрицы и избыточных фаз сильно изменяются: снижается прочность и повышается пластичность. Поэтому при высокотемпературных превращениях, даже в случае большого различия удельных объемов фаз, происходит релаксация напряжений в результате микропластических сдвигов и не возникает больших остаточных напряжений. Превращения при температурах в зоне упругости сплава и пониженной пластичности вызывают большие временные напряжения, релаксация которых может осуществляться только путем микроразрушений – образования микротрещин. Наиболее опасны с этой точки зрения фазовые превращения в высоколегированных сталях с мартенситной матрицей, в отбеленных чугунах с ледебуритной матрицей и в жаропрочных сплавах, содержащих большое количество интерметаллидов.

В зависимости от температурных условий образования трещины подразделяются на горячие и холодные. Горячие трещины обычно имеют усадочное происхождение и возникают в интервале температур затвердевания сплава. Они проходят по границам макрозерна и имеют неровную окисленную поверхность, на которой иногда видны дендриты. В крупных дендритах горячие трещины могут образовываться по периферии дендритных ячеек. Холодные трещины возникают вследствие высоких внутренних напряжений в отливке. Они обычно имеют гладкую светлую или зернистую поверхность с цветами побежалости.

Зарождение и развитие трещин в отливках определяются четырьмя группами факторов: 1) податливостью формы, а также ее теплофизическими свойствами и конструкцией; конструкцией отливки (наличием тепловых узлов и сочетанием различных сечений, способом подвода металла и т.д.); 3) условиями формирования отливки, определяющими последовательность затвердевания ее частей, а также возможность получения заданной макро- и микроструктуры сплава; 4) усадочными, механическим и теплофизическими свойствами сплава, а также характером его кристаллизации. Технологические условия литья влияют путем изменения кинетики формирования отливки.

В настоящее время проблема трещинообразования в отливках приобретает особое значение, так как широко используются неподатливые формы (кокили, пресс-формы для литья под давлением, керамические формы), а также высоколегированные специальные сплавы, содержащие большое количество хрупких интерметаллидных фаз и имеющие повышенную склонность к трещинообразованию.

Наиболее характерны для отливок горячие трещины. Их зарождение начинается с момента перехода сплава в твердожидкое состояние при температуре ниже температуры образования твердого скелета $t_{ск}$ и начала свободной линейной усадки, то есть в эффективном интервале затвердевания. Горячие трещины образуются вследствие торможения свободной усадки со стороны формы или стержней и локализации возникающей при этом деформации растяжения. В то же время при температурах, близких к температуре солидуса, сплавы обладают низким комплексом механических свойств: малой прочностью (примерно 1...2 МПа) и пониженной пластичностью (рис. 5.25). Явление резкого падения пластичности вблизи t_s получило название высокотемпературной хрупкости или горячеломкости, а опасный интервал температур между $t_{ск}$ и t_s назван температурным интервалом хрупкости (ТИХ). В этом же интервале температур наблюдается наибольшая усадочная деформация. Такое неблагоприятное сочетание факторов приводит к повышенной вероятности образования трещин в зоне горячеломкости.

Зарождение и развитие трещин связаны с наличием некоторого количества жидкой фазы – «жидких прослоек» по границам дендритов (порядка 5...15 %). Разрывы по стыкам дендритов образуются в том случае, когда усадочная деформация превосходит некоторую критическую величину, допустимую для интервала хрупкости. Если количество жидкой фазы составляет более 20...25 %, то возможно «залечивание» возникающих разрывов поступающим расплавом. Этим объясняется снижение горячеломкости при температуре, близкой к $t_{ск}$ или концентрации компонентов более $C_{ск}$. Таким образом, критическое количество жидкой фазы, наиболее опасное для образования горячих трещин.

Склонность сплавов к образованию трещин связана с шириной температурного интервала кристаллизации. Формирование усадочных напряжений $\sigma_{ус}$ происходит в период прохождения сплавом эффективного интервала затвердевания, причем максимум $\sigma_{ус}$ соответствует максимуму $\Delta t_{затв}^{эф}$. В то же время из-за образования жидких прослоек по границам зерен запас пластичности ψ в этих сплавах минимален (рис. 5.26). В связи с этим сплавы склонны к образованию горячих трещин и имеют минимальную трещиностойчивость. Как следует из рис. 5.26, эти сплавы располагаются между точками $C'_p - C_p$, так как затвердевание сплавов в реальных условиях завершается при температуре неравновесного солидуса.

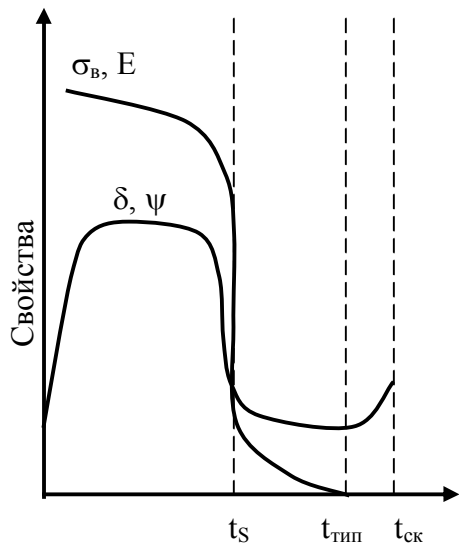


Рис. 5.25. Схема изменения механических свойств сплава вблизи температуры солидуса t_s с учетом температуры границы питания $t_{тип}$ и температуры образования твердого скелета $t_{ск}$

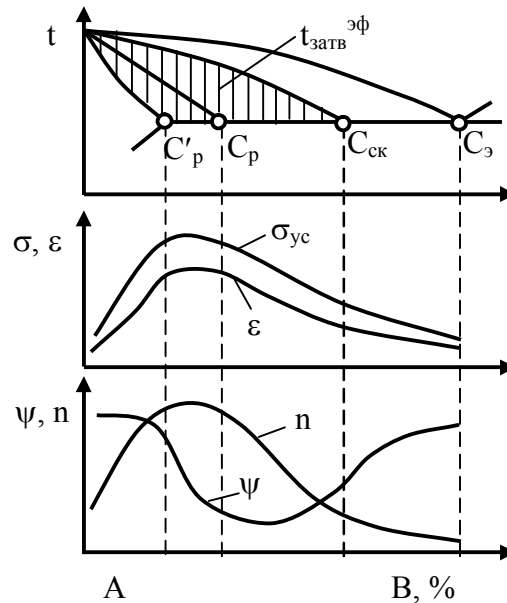


Рис. 5.26. Изменение усадочных свойств сплавов в эвтектической системе: $\sigma_{ус}$ – усадочные напряжения; ϵ – деформация; ψ – запас пластичности; n – склонность к образованию горячих трещин

В системах с небольшой растворимостью в твердом состоянии (Al-Si) сплавы с минимальной трещиностойкостью имеют концентрацию вблизи C_p , в системах со значительной растворимостью (Al-Cu, Al-Mg) наибольшее количество трещин отмечается в сплавах с концентрацией меньше C_p , то есть соответствует точке C'_p . В чистых металлах и узкоинтервальных сплавах с большим количеством эвтектики развивается последовательная кристаллизация, дендриты не разделяются прослойками жидкой фазы, трещиностойкость имеет максимальные значения. Развитие горячих трещин зависит также от макро- и микроструктуры сплавов. Наибольшей трещиностойкостью обладает равномерная мелкозернистая макро- и микроструктура, значительно меньшей – крупнозернистая структура.

Столбчатая структура образует «поверхности слабины» в местах стыка двух фронтов кристаллизации. Включения окисных пленок и неметаллических частиц также снижают трещиностойкость. Фазовые превращения в сплавах действуют различным образом на трещиностойкость. Образование фаз с большим удельным объемом в твердожидком состоянии или при высокой температуре снижает усадочную деформацию и вследствие этого – склонность к образованию горячих трещин (выделение графита в серых чугунах резко повышает их трещиностойкость). В других случаях фазовая перекристаллизация увеличивает усадочную деформацию и

трещиностойчивость падает. (Так влияет превращение $\delta \rightarrow \gamma$ в низкоуглеродистых сталях).

В тройных и много компонентных сплавах причины и механизм возникновения трещин аналогичен двойным сплавам. Принцип «критического количества жидкой фазы» позволяет предсказывать, что добавки или примеси, вызывающие в сплавах образование небольшого количества легкоплавкой эвтектики, обычно располагающейся по границам дендритных ячеек и расширяющей $\Delta t_{\text{затв}}^{\text{эф}}$, приведут к резкому падению трещиностойчивости сплава.

В приведенных выше зависимостях склонность сплава к образованию трещин рассматривалась как среднестатистическая характеристика возникновения трещин в специальных литых пробах или фасонных отливках.

Для количественной характеристики горячеломкости сплавов предлагается использовать предельную (упругую) деформацию этих сплавов при температуре солидуса $\varepsilon \approx \sigma_0/E_1$, где σ_0 – прочность, а E_1 – модуль упругости сплавов при температуре солидуса.

Необходимо отметить, что известные показатели горячеломкости удовлетворительно коррелируются с экспериментальными данными, но не могут предложить надежную априорную оценку свойств сплава. В связи с этим склонность сплавов к образованию трещин обычно оценивается по специальным технологическим пробам. Наибольшее распространение получили два метода: 1) определение «критического сечения» (или длины) образцов из сплавов различного химического состава, при котором в условиях полностью затрудненной усадки горячие трещины еще не появляются; 2) определение «критического состава», при котором наблюдается появление трещин (испытание сплавов производится на одинаковых образцах). Оба метода дают численно отличающиеся значения, но пригодны для качественных сравнений.

Борьба с горячими трещинами большей частью осуществляется технологическим путем (увеличением податливости форм, изменением конструкции отливки и т.д.), так как марка сплава обусловлена технологическими условиями и не может произвольно изменяться. Однако нельзя недооценивать роль структуры и свойств сплава. Незначительные изменения химического состава (в пределах допуска), снижение содержания вредных примесей, введение небольших технологических добавок, модифицирование – все это может значительно увеличить трещиностойчивость сплава и резко снизить брак по горячим трещинам без изменения технологии изготовления формы и конструкции отливки или тепловых условий ее формирования.

5.1.7. Метод компьютерного моделирования в системе анализа литейных процессов

Для анализа тепловых процессов, протекающих в теле остывающей отливки, широко используются методы компьютерного моделирования.

Первый этап компьютерного анализа литейного процесса – построение трехмерной модели отливки и формы. Если система компьютерного моделирования литейных процессов не имеет собственного средства построения трехмерной модели, то необходимо дополнительно использовать САД-систему, позволяющую проводить твердотельное и поверхностное моделирование, например, Solidworks.

Второй этап – представление созданной трехмерной модели в виде, необходимом для расчетов в системе компьютерного моделирования литейных процессов. Существует два основных математических метода реализации представления геометрии в подобных системах анализа: конечных разностей и конечных элементов.

Метод конечных разностей (МКР) базируется на уравнениях в дифференциальной форме, при этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями. Они строятся на ортогональных сетках (прямоугольной, цилиндрической и т.д.), что позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к последовательности одномерных задач, а значит, существенно упростить и ускорить решение общей системы уравнений. К недостаткам метода следует отнести плохую аппроксимацию границ сложных областей, что не слишком принципиально для уравнений теплопроводности, но весьма существенно для уравнений гидродинамики. Кроме того, метод плохо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки.

Методы конечных элементов (МКЭ) базируется на уравнениях тепло-массопереноса в интегральном виде. Область, в которой решаются уравнения, разбивается на элементы, внутри которых строятся аппроксиманты функций на основе системы базисных функций, определенных на элементе. «Проецируя» интегральные уравнения на эти базисы, получают систему разностных уравнений. Система значительно сложнее принятой в МКР, ее решение требует больших ресурсов памяти и немалого времени. Одним из главных достоинств метода конечных элементов является хорошая аппроксимация границ, а основными недостатками – необходимость в мощном генераторе конечных элементов, сложность уравнений и невозможность факторизации.

При решении некоторых литейных вопросов предпочтителен метод конечных элементов. Например, с получением тонкостенных отливок больших геометрических размеров, МКЭ обеспечивает ряд преимуществ. Он позволяет использовать конечные элементы разной дискретности. Приме-

нение метода конечных разностей в подобных случаях приводит к увеличению количества узлов сетки, а, следовательно, к большей продолжительности компьютерного расчета.

Третий этап в компьютерном анализе – проведение моделирования литейных процессов и оптимизация технологии изготовления отливки.

Современное развитие компьютерной техники полностью снимает ограничения по объему оперативной памяти персональных компьютеров, необходимой для решения самых сложных задач, с которыми сталкиваются технологи-литейщики. Как показывает практика, для решения большинства производственных задач методом конечных разностей достаточно 512 Мбайт оперативной памяти.

Сегодня в мире насчитывается более десяти систем автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП). Специалистам хорошо известны немецкая программа Magma и американская ProCast, в этом же ряду нужно упомянуть американскую SolidCast, финскую CastCAE и немецкую WinCast. Отечественные разработки в области систем автоматизированного моделирования литейных процессов представлены двумя программными продуктами: Полигон (разработчик – ООО «Фокад», Санкт-Петербург) и LVMFlow (разработчик – ЗАО «НПО МКМ», Ижевск) с методами МКЭ и МКР, соответственно.

САМ ЛП «Полигон» позволяет адекватно моделировать литейные процессы для всех способов литья (литье в разовые песчаные формы, кокиль, литье под давлением и т.д.), но ее использование требует высокой квалификации инженера-литейщика, в частности для создания конечно-элементной сетки элементов. В САМ ЛП LVMFlow разбиение геометрической модели отливки на расчетные элементы происходит автоматически – технологу нужно только указать размер «ячейки». Однако, практический опыт показал, что ее применение дает наиболее надежные результаты моделирования для литья в песчаные формы. Ниже рассмотрены особенности наиболее простой в использовании САМ ЛП LVMFlow.

LVMFlow позволяет промоделировать процесс заполнения формы и затвердевания сплава. Динамика процесса несёт в себе большое количество информации, поэтому отображению результатов моделирования в пакете уделено большое внимание. Температура, доля жидкой фазы, скорость течения расплава, доля усадочных дефектов выводятся на каждом временном шаге.

В LVMFlow существует широкий спектр входных параметров, позволяющих моделировать различные технологические решения. Хотя LVMFlow не имеет своей системы геометрического моделирования, он конвертирует файлы форматов DXT, CAT, STL, ASCLL во внутренний формат, изменяя ориентацию отливки в пространстве, масштабирует геометрию, а также собирает конструкцию из геометрических образцов, хра-

нящихся в различных файлах. То есть может быть осуществлен подбор систем к проектируемой отливке.

В LVMFlow может быть промоделирована кристаллизация широкого спектра сплавов. Это – углеродистые, коррозионно-стойкие и легированные стали, серые и другие чугуны, силумины, сплавы никелевые и никель-кобальтовые, оловянные и безоловянные бронзы, латуни, магниевые и цинковые сплавы.

Основой для моделирования фазовых превращений является бинарная равновесная диаграмма состояний. Все изменения диаграммы учитываются в линейном приближении.

Ближайший шаг в развитии LVMFlow – описание фазовых равновесий с использованием в качестве основы трехкомпонентной диаграммы состояний. Для корректного описания геометрии отливки сложной формы необходима мелкая разностная сетка.

Хранящиеся в базе данных сплавы могут быть «отлиты» в песчаную форму, кокиль, оболочковую форму. Литье может быть опочным и безопочным.

Окружающей средой может быть и воздух и вакуум. Для границы металл-форма задаются параметры воздушного зазора, а также противогарного покрытия, если оно применяется.

Для создания направленной кристаллизации могут использоваться экзотермические материалы, ТЭНы, каналы с подаваемыми в них жидкостями или газами. Может быть промоделирован предворительный прогрев формы, а также следующие циклы: заполнение, затвердевание, охлаждение формы. Начальные температуры для расплава и формы; технологической оснастки и среды также являются входными параметрами.

Моделировать течение расплава можно как вместе с литниково-питающей системой, так и без нее. Во втором случае граничные условия для уравнений Навье-Стокса задаются на питателях, по которым расплав попадает в отливку.

Граничные условия для задачи заполнения отливки реализованы для следующих типов заливки: из ковша со стопорным отверстием; при постоянном напоре; из ковша чайникового типа с заданием расстояния ковша от отливки, диаметра и угла выливаемой струи; под давлением, причем вводимые параметры делятся на три типа: время заполнения отливки, временная зависимость входного потока, зависимость входного потока от положения границы расплава.

Во время моделирования течения возможно проследить движение твердых частиц различной плотности и размеров. Так как моделирование процесса занимает значительное время, в LVMFlow предусмотрены упрощенные варианты. Во время работы литниково-питающей системы можно моделировать течение расплава без учета его кристаллизации. Иногда заполнение отливки расплавом слабо влияет на ход затвердевания. В этом слу-

чае можно осуществить моделирование только затвердевания, считая, что отливка заполнилась мгновенно и температура расплава осталась однородной. Эти приближения вносят определенную погрешность, но на начальном этапе проектирования технологии они полезны.

Моделируя литейный процесс, вы наблюдаете его изнутри и можете измерить все рассчитываемые параметры в любом месте отливки. LVMFlow предоставляет возможность записать показания «термопар». В отличие от реальных, термопары в LVMFlow выводят не только временную зависимость температуры, но и доли жидкой фазы, скорости остывания, скорости расплава и давления в указанной точке, а также входного потока.

Результаты моделирования можно сохранять автоматически для дальнейшего просмотра и создания архива технологических решений. На отливку заводится «паспорт», в который записываются все параметры каждого моделирования. Таким образом, LVMFlow предлагает широкий набор инструментов для моделирования, исследования и создания оптимальной литейной технологии.

5.2. Варианты контрольных заданий

Задание 5.2.1. Расчет прибыли по методу Василевского

В соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 5.8, определить размеры конической прибыли на отливке из углеродистой стали I и II типов. Выполнить эскиз прибыли и отливки с указанием размеров. Для I типа питания отливки принять $H_{\text{п}} / D_{\text{п}} = 1,5$. Протяженность прибыли принять равной 50 % от протяженности стенки отливки. Для II типа питания отливки выбрать исполнение I прибыли.

Пример выполнения задания 5.2.1 (вариант «Пример»).

На рис. 5.27 приведены схемы питания отливки для расчетов прибыли по методу Василевского.

Для I схемы при толщине стенки отливки 200 мм и $H_{\text{п}} / D_{\text{п}} = 1,5$ по табл. 5.4 имеем $D_{\text{п}} / \delta_0 = 2,0 \dots 2,3$. Принимаем $D_{\text{п}} / \delta_0 = 2,0$. Тогда

$$D_{\text{п}} = 2\delta_0 = 2 \cdot 200 = 400 \text{ мм.}$$

Учитывая, что $H_{\text{п}} / D_{\text{п}} = 1,5$, высота прибыли равна

$$H_{\text{п}} = 1,5D_{\text{п}} = 1,5 \cdot 400 = 600 \text{ мм.}$$

$$B_{\text{п}} = 0,5B_0 = 0,5 \cdot 800 = 400 \text{ мм.}$$

Имеем объемы отливки и прибыли равные соответственно $0,128 \text{ м}^3$ и $0,096 \text{ м}^3$. Технологический выход годного по формуле (5.5)

$$\text{ТВГ} = \frac{0,128}{(1 - 0,045) \cdot (0,128 + 0,096)} \cdot 100 = 60\% .$$

Варианты задания 5.2.1

№ варианта	Тип питания отливки	Толщина стенки, δ_0 , мм	Длина стенки, L_0 , мм	Ширина стенки, B_0 , мм	Высота стенки, H_0 , мм
Пример	I, II	200	800	800	—
5.1	I	220	1000	1000	—
5.2	I	180	900	900	—
5.3	I	150	600	600	—
5.4	I	120	700	700	—
5.5	I	100	500	500	—
5.6	I	90	500	400	—
5.7	I	80	400	400	—
5.8	I	70	400	300	—
5.9	I	60	300	300	—
5.10	I	50	300	200	—
5.11	II	200	1500	—	2000
5.12	II	180	1200	—	1000
5.13	II	150	1000	—	800
5.14	II	130	900	—	1500
5.15	II	120	800	—	1400
5.16	II	110	700	—	1300
5.17	II	100	600	—	1200
5.18	II	180	500	—	1100
5.19	II	140	300	—	1000
5.20	II	130	400	—	800

Из табл. 5.7 для отливки массой 921,6 кг с $\delta_0 = 200$ мм ТВГ равный 60 % является приемлемым.

Для II схемы при толщине стенки отливки 200 мм и $H_0 / \delta_0 = 4$ по табл. 5.5 $D_{II} / \delta_0 = 1,2 \dots 1,4$. Принимаем $D_{II} / \delta_0 = 1,2$. Тогда

$$D_{II} = 1,2\delta_0 = 1,2 \cdot 200 = 240 \text{ мм.}$$

Учитывая, что $H_{II} / D_{II} = 1,1 \dots 1,3$ (табл. 5.5), высота прибыли равна

$$H_{II} = 1,1D_{II} = 1,1 \cdot 240 = 264 \text{ мм.}$$

$$B_{II} = 0,5B_0 = 0,5 \cdot 800 = 400 \text{ мм.}$$

$$\text{ТВГ} = \frac{0,128}{(1 - 0,045) \cdot (0,128 + 0,025)} \cdot 100 = 88\%.$$

При изменении положения отливки при заливке удастся уменьшить размеры прибыли и увеличить ТВГ.

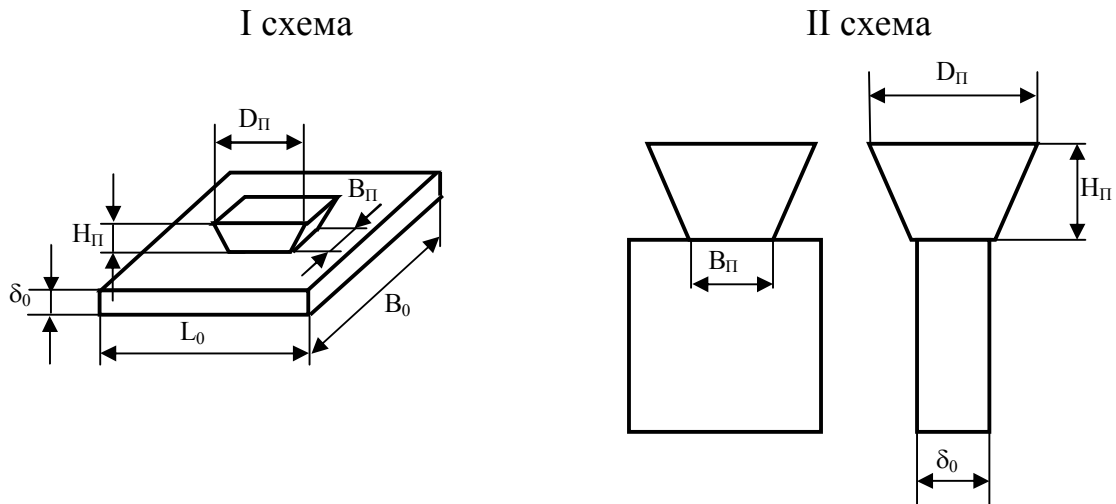


Рис. 5.27. Схемы питания отливки

Задание 5.2.2. Расчет прибыли по методу Пржибыла

В соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 5.9, определить размеры цилиндрической открытой прибыли на отливке, полученной в песчаной форме. Расчеты вести для прибылей с атмосферным давлением в усадочной раковине. Принять площадь основания прибыли равной площади питаемого узла.

Пример выполнения задания 5.2.2 (вариант «Пример»).

Находим объем питаемого узла:

$$V_y = \delta_0 L_0 B_0 = 20 \cdot 80 \cdot 80 = 128000 \text{ мм}^3.$$

Объем прибыли V_{Π} определим по формуле (5.4):

$$V_{\Pi} = \frac{10 \cdot 0,045}{1 - 10 \cdot 0,045} \cdot 128000 = 104727 \text{ мм}^3.$$

Из найденного объема определим размеры прибыли. Принимаем площадь основания прибыли равной площади питаемого узла:

$$F_y = F_{\Pi} = B_0 L_0 = 80 \cdot 80 = 6400 \text{ мм}^2.$$

Тогда диаметр прибыли

$$d_{\Pi} = \sqrt{\frac{4F_{\Pi}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 6400}{3,14}} = 90 \text{ мм}.$$

Высота прибыли

$$H_{\Pi} = \frac{V_{\Pi}}{F_{\Pi}} = \frac{104727}{6400} = 16 \text{ мм}.$$

Варианты задания 5.2.2

№ варианта	Сплав	Форма питаемого узла отливки	Размеры питаемого узла отливки, мм					
			δ_0	L_0	B_0	H_0	D_0	d_0
Пример	Углеродистая сталь	Плита	20	80	80	–	–	–
5.21	Углеродистая сталь	Цилиндр	–	–	–	800	200	–
5.22	Углеродистая сталь	Полый цилиндр	–	–	–	500	300	200
5.23	Углеродистая сталь	Плита	50	100	100	–	–	–
5.24	Углеродистая сталь	Цилиндр				400	300	–
5.25	Алюминиевый	Плита	30	40	50	–	–	–
5.26	Алюминиевый	Цилиндр	–	–	–	600	150	–
5.27	Алюминиевый	Полый цилиндр	–	–	–	300	400	200
5.28	Алюминиевый	Плита	40	200	200	–	–	–
5.29	Латунь	Плита	70	100	190	–	–	–
5.30	Латунь	Цилиндр	–	–	–	200	100	–
5.31	Латунь	Полый цилиндр	–	–	–	180	150	100
5.32	Латунь	Плита	20	40	40	–	–	–
5.33	Бронза	Плита	25	60	50	–	–	–
5.34	Бронза	Цилиндр	–	–	–	100	50	–
5.35	Бронза	Полый цилиндр	–	–	–	1000	500	300
5.36	Бронза	Цилиндр	–	–	–	80	120	–
5.37	Высокопрочный чугун	Плита	80	400	400	–	–	–
5.38	Высокопрочный чугун	Цилиндр	–	–	–	500	300	–
5.39	Высокопрочный чугун	Полый цилиндр	–	–	–	400	200	110
5.40	Высокопрочный чугун	Цилиндр	–	–	–	400	800	–

Объемы отливки и прибыли равны соответственно 128000 мм³ и 104727 мм³. Тогда технологический выход годного по формуле (5.5) составит

$$\text{ТВГ} = \frac{128000}{(1 - 0,045) \cdot (128000 + 104727)} \cdot 100 = 58\%.$$

По табл. 5.7 для отливок массой 1 кг и открытой прибыли ТВГ равный 58 % является приемлемым значением.

Задание 5.2.3. Компьютерный анализ литейных процессов

В соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 5.9, провести компьютерное моделирование процесса заполнения формы, анализ кинетики затвердевания и усадки отливок.

Пример выполнения задания 5.2.3.

Провести компьютерное моделирование процесса заполнения формы и выбрать оптимальный вариант технологии изготовления стальной отливки «Плита» (сталь 110Г13Л) (рис. 5.28).

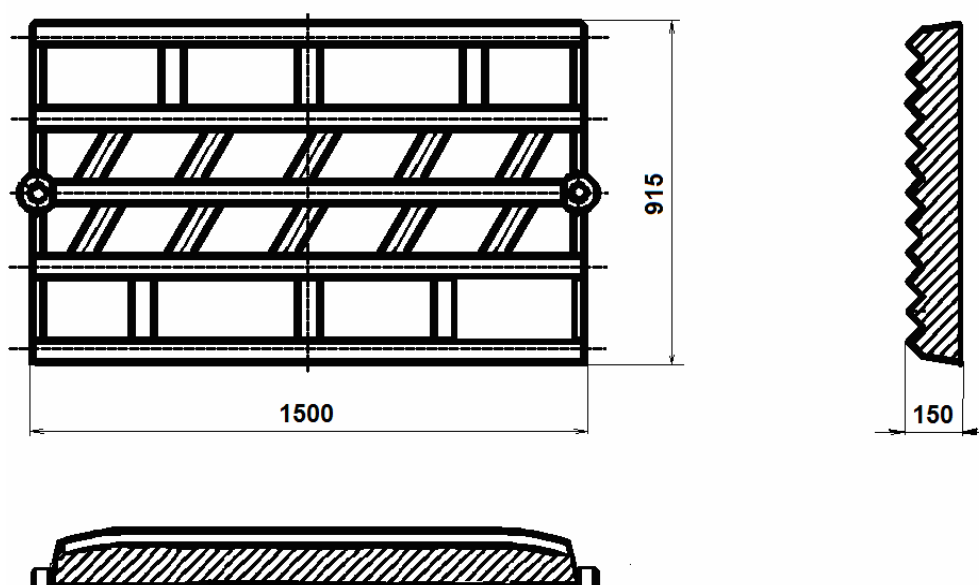


Рис. 5.28. Отливка «Плита»

В соответствии с методикой проведения компьютерного инженерного анализа сначала строим в SolidWorks твердотельную модель плиты и модель литниковой системы (рис. 5.29). Далее в LVMFlow создали конечно-разностную сеточную модель плиты с ЛС (рис. 5.30).

Используя базу данных системы LVMFlow, назначаем материал формы (песчаная форма), выбираем сплав (сталь 110Г13Л), задаем начальные температуры (1450 °С для металла и 20 °С для формы), определяем место подвода расплава в литниковой воронке и производим компьютерный расчет процесса заливки формы сталью и затвердевания плиты.

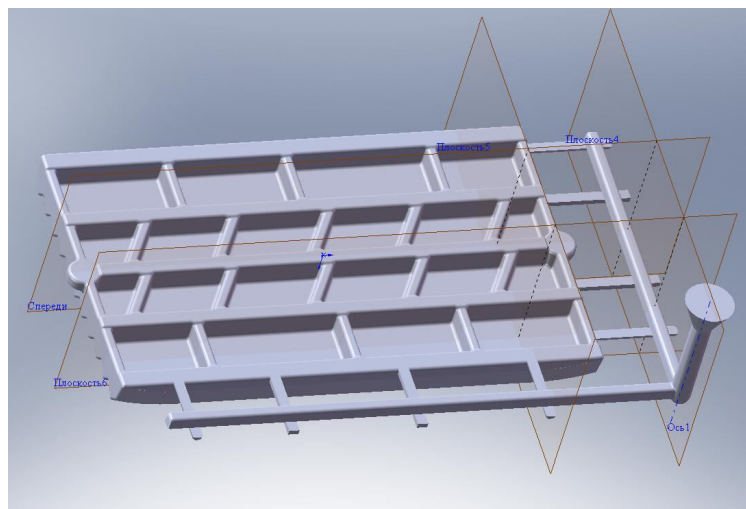


Рис.5.29. Трехмерная САD-модель отливки «Плита» с литниковой системой

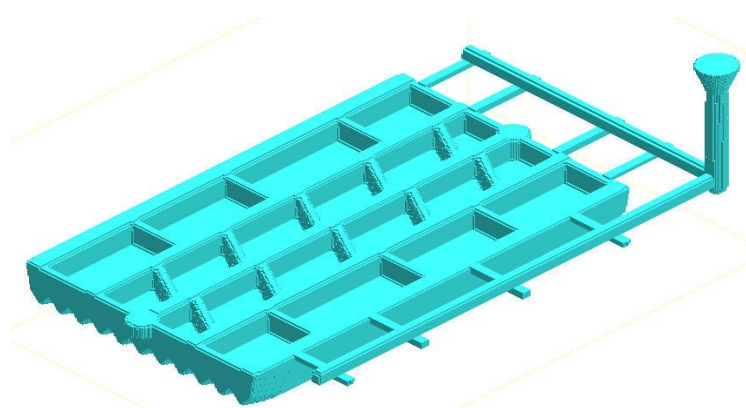


Рис.5.30. Конечно-разностная модель плиты с литниковой системой

На первом этапе компьютерного моделирования варьируем тип литниковой системы – I-ЛС, V-ЛС, Г-ЛС, С-ЛС (рис. 5.31). При этом задаем следующие параметры литниковой системы: $\Sigma F_{п}:\Sigma F_{шл}:\Sigma F_{ст} = 1,1 : 1,0 : 1,0 = 34 : 31 : 31$ (см²). Анализ рассматриваемых конструкций литниковых систем показал, что наименьшая величина усадочных явлений соответствует варианту Г-ЛС (рис. 5.32).

На втором этапе варьируем место простановки прибылей на отливке с оптимальным вариантом литниковой системы (рис. 5.33). Расчет прибыли проводим по методу Й. Пржибыла ($V_{пр} = 11000$ см³). Анализ результатов

компьютерного моделирования представлен на рис. 5.34. Оптимальным является 3 вариант простановки прибыли.

Таким образом, используя современные компьютерные программы инженерного анализа выбраны оптимальная конструкция литниковой системы и место установки прибыли.

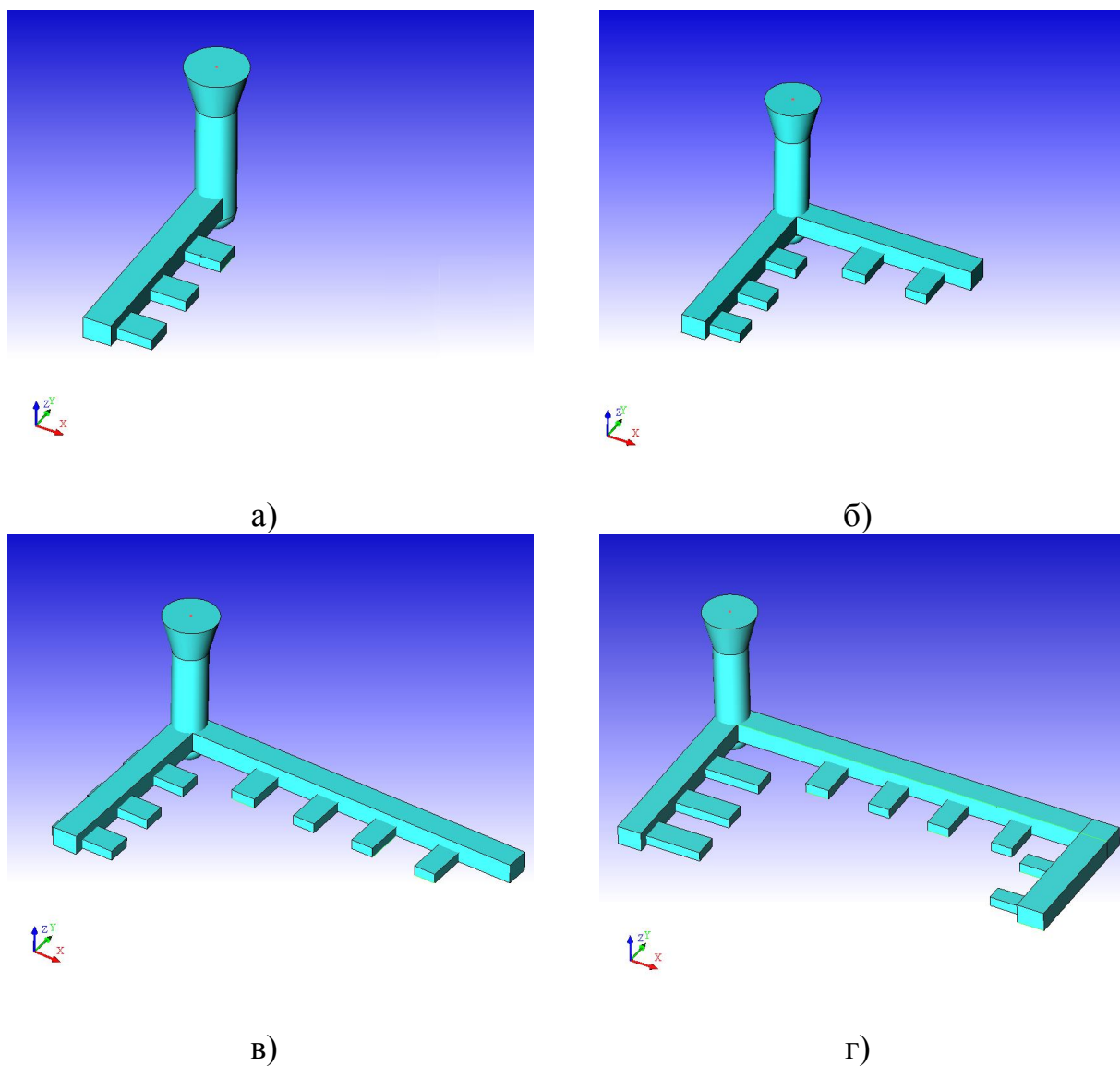


Рис. 5.31. Исследуемые конструкции горизонтальной ЛС:
а–I-образная (I-ЛС); б–V-образная (V-ЛС); в–Г-образная (Г-ЛС);
г–С-образная (С-ЛС)

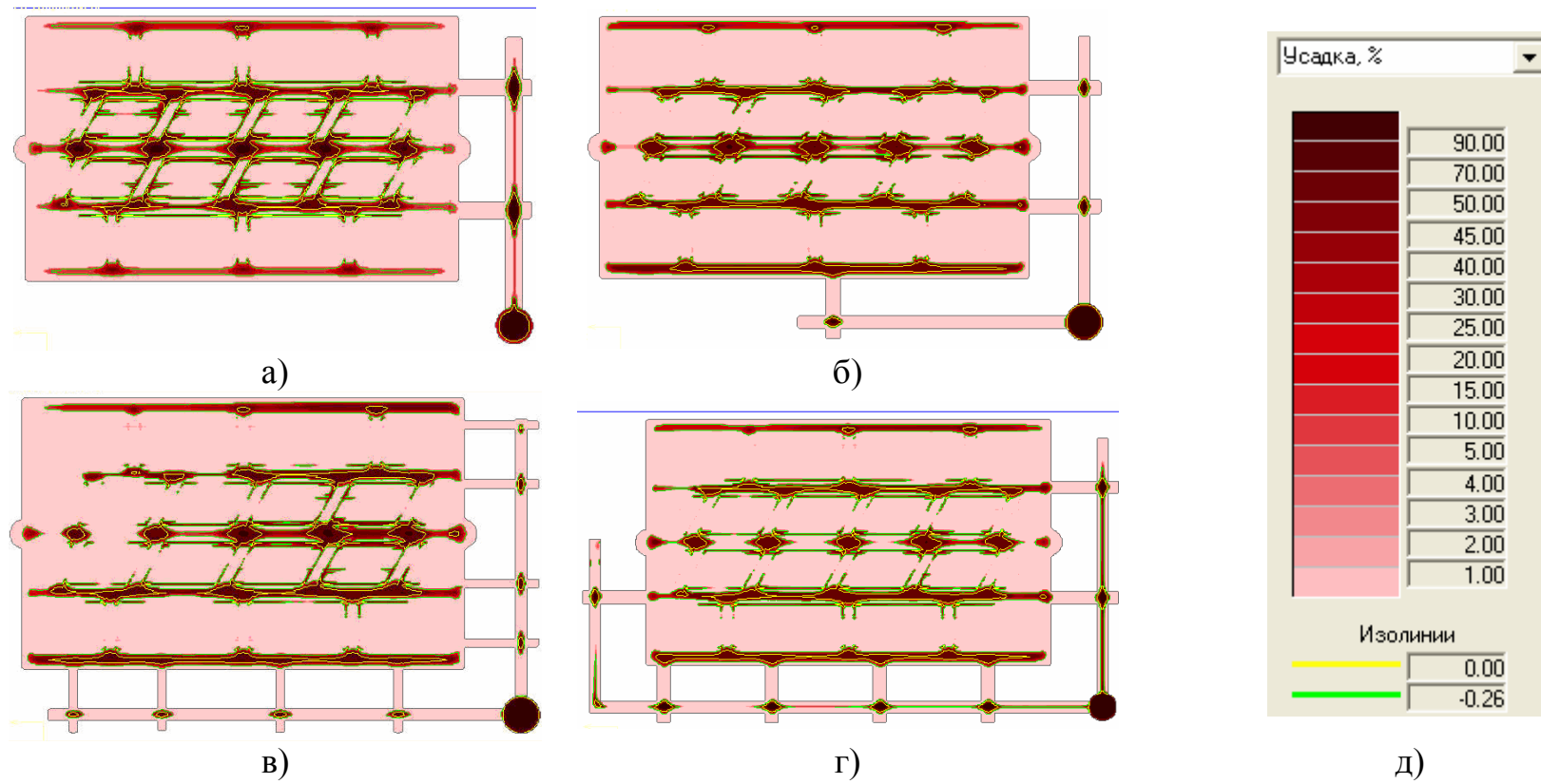


Рис. 5.32. Усадочные дефекты в плите:
 а – с I-ЛС; б – с V-ЛС; в – с Г-ЛС; г – с С-ЛС, д – шкала усадки, %

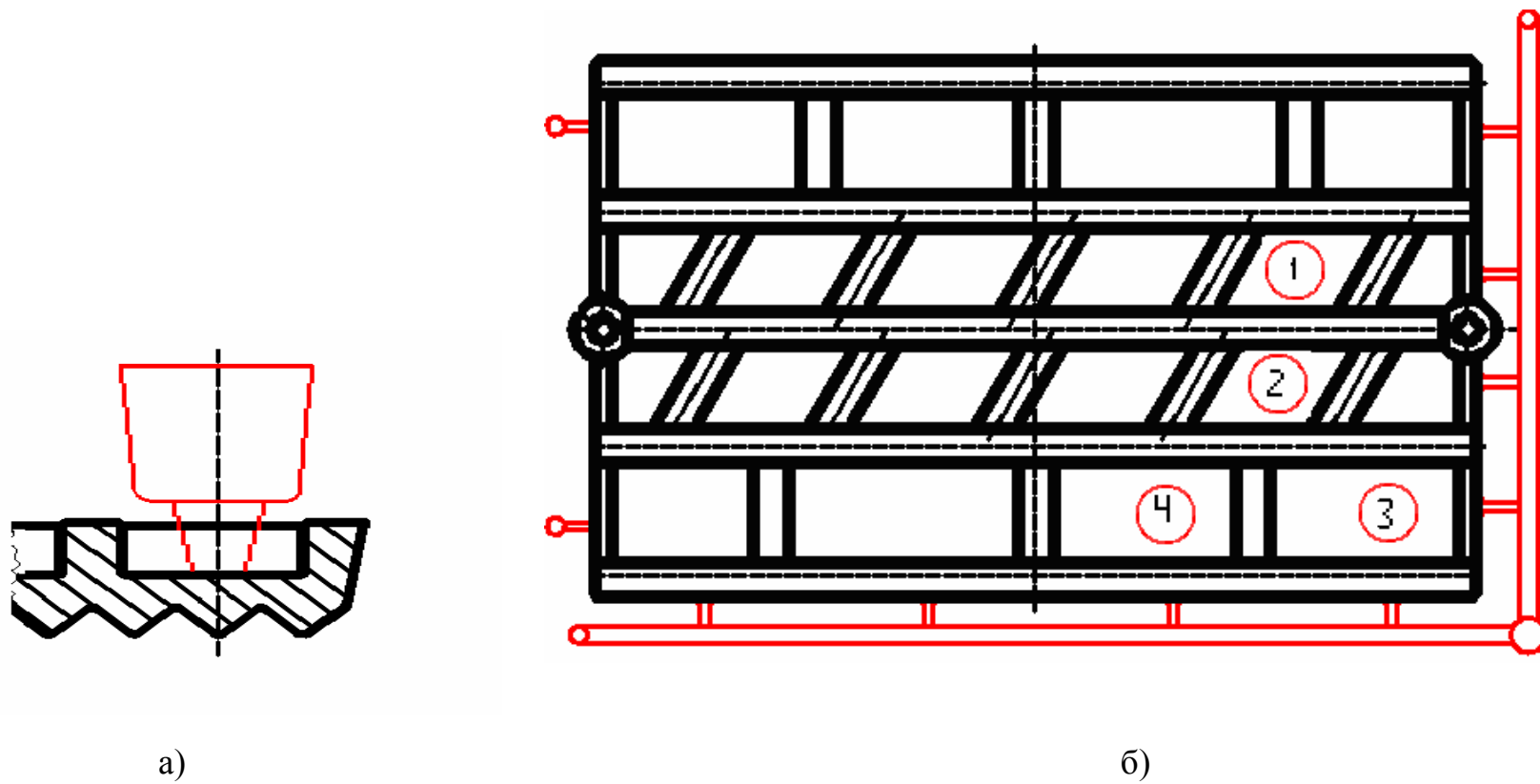


Рис. 5.33. Исследуемые места установки прямой прибыли:
а – конструкция прибыли; б – варианты установки прибыли

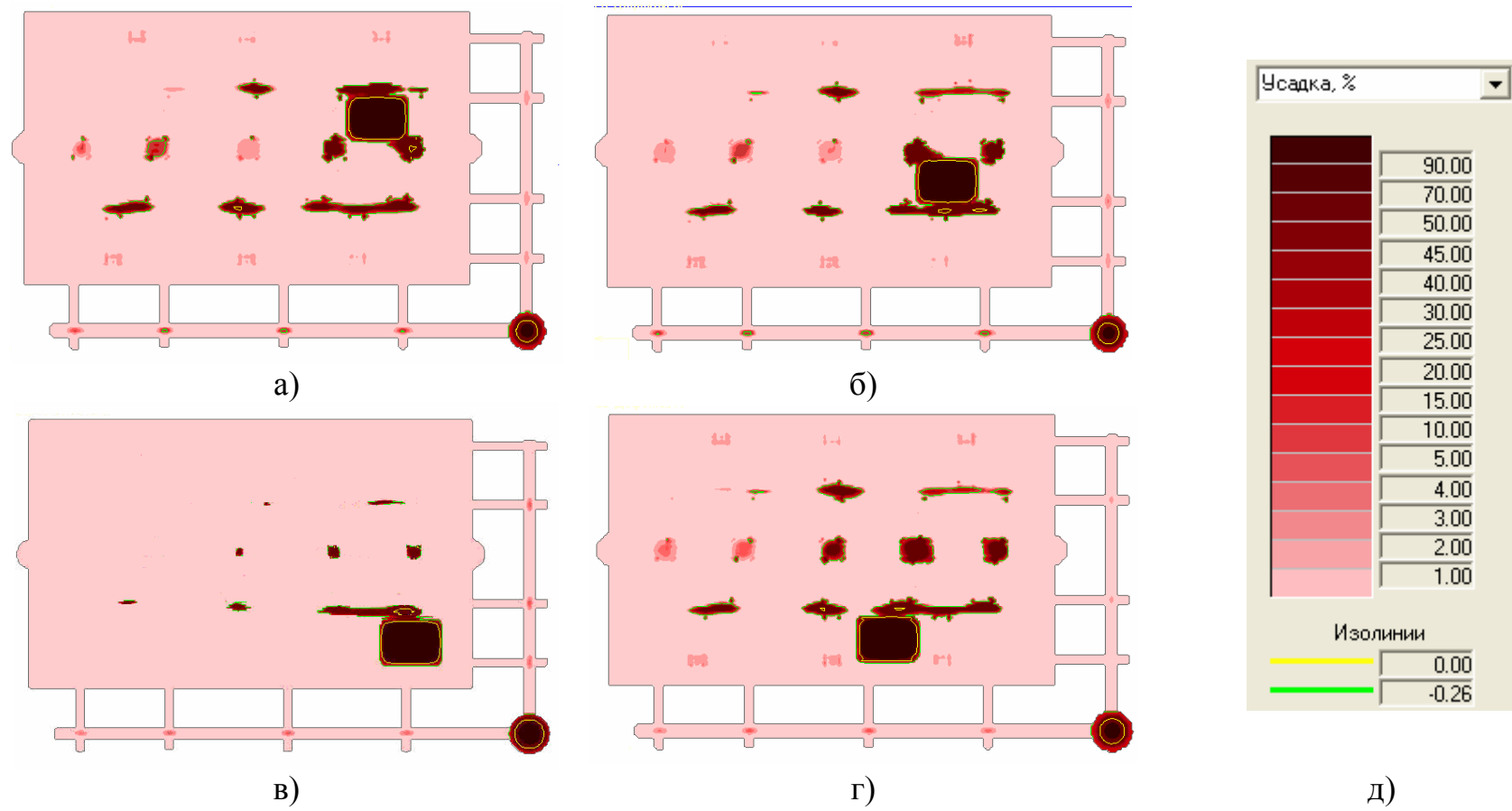


Рис. 5.34. Усадочные дефекты в плите с Г-ЛС и прибылью:
 а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3; г – вариант 4, д – шкала усадки, %

5.3. Лабораторные работы

Работа 5.3.1. Влияние скорости охлаждения расплава в форме на кристаллическую структуру отливки

Цель работы. Исследование влияния скорости охлаждения на структуру и механические свойства алюминиевых сплавов.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь сопротивления с рабочей температурой до 900 °С, термопары хромель-алюмелевые из проволоки диаметром 0,3...0,5 мм, потенциометр КСП-4, изложницы с поддонами для слитков диаметром 40 мм и высотой до 150 мм, модельно-опочная оснастка для получения образцов таких же размеров в песчаных формах, формовочный инструмент, полировальные столики и комплект шлифовально-полировальных материалов для них, шихтовые материалы и лигатура для выплавки алюминиевых сплавов, металлографический микроскоп, реактивы для травления образцов при исследовании микроструктуры, твердомер, спецодежда и защитные очки или лицевые щитки, рукавицы.

Порядок выполнения работы.

1. По заданному преподавателем составу рассчитать количество алюминия и лигатуры, необходимое для получения двух килограммов сплава (силумина).
2. Загрузить шихту в тигель и расплавить ее. Довести температуру сплава до 700 °С.
3. Подготовить металлическую изложницу к заливке. Подогреть изложницу до 80 °С.
4. Изготовить песчаную форму.
5. Установить термопары в изложницу и песчаную форму. Спай должен располагаться в центре сечения на половине высоты полости формы.
6. Подключить термопары к самопишущим приборам (потенциометр), включить движение ленты.
7. Залить обе формы расплавом.
8. Оставшийся металл с тиглем поместить обратно в отключенную печь и опустить в расплав термопару, подключенную к потенциометру.
9. Остывшие до 350 °С слитки извлечь из форм, а металл из тигля, предварительно отсоединив термопары.
10. Из остывших до нормальных температур отливок вырезать около горячего сая образцы размером 15×15×15 мм.
11. Зачистить и отполировать на образцах площадку размером 10×10 мм.
12. Протравить шлиф до выявления дендритной структуры.
13. Вырезать диаграммную ленту с записью показаний.

14. По кривым охлаждения, зафиксированным на диаграммной ленте, определить скорости охлаждения сплава в интервале кристаллизации при литье в металлическую, песчаную формы и при кристаллизации в тигле. На микроскопе, используя объект-микрометр и окуляр с сеткой, определить средний размер дендритной ячейки в полученных образцах сплава по 30 измерениям.

15. Статистически обработать результаты измерения дендритной ячейки. Рассчитать дисперсию и найти доверительный интервал при вероятности 0,95. Оценить относительную погрешность измерений. Шлифы после исследования микроструктур использовать для определения твердости на твердомере.

Содержание отчета.

1. Название работы.
2. Краткое изложение основных положений теории.
3. Описание методики проведения опытов.
4. Результаты замеров дендритной ячейки и расчетов скорости охлаждения.
5. Графики зависимости размера ячейки от скорости охлаждения в простой и логарифмической форме.
6. График зависимости твердости от скорости заливки.
7. Рисунки микроструктур.
8. Выводы.

Работа 5.3.2. Определение объема усадочных пустот в отливках

Цель работы. Освоить методику определения усадочных пустот в отливках.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь СШОЛ со стальным тиглем, высокочастотная индукционная печь с графитовым тиглем, модельная оснастка для определения объемной усадки, опоки, формовочный инструмент, лабораторные бегуны, шихта, потенциометр, термомпара погружения ХА, мерная емкость (мензурка), штангенциркуль, вода, керосин.

Порядок выполнения работы.

1. Приготовить сплав заданного химсостава в количестве 5...12 кг.
2. Приготовить формы технологической пробы для определения объема усадочных раковин и пористости (рис. 5.35).
3. Залить формы сплавами, перегретыми на 100 °С над ликвидусом, охладить отливки, выбить их из формы и очистить от формовочной смеси.

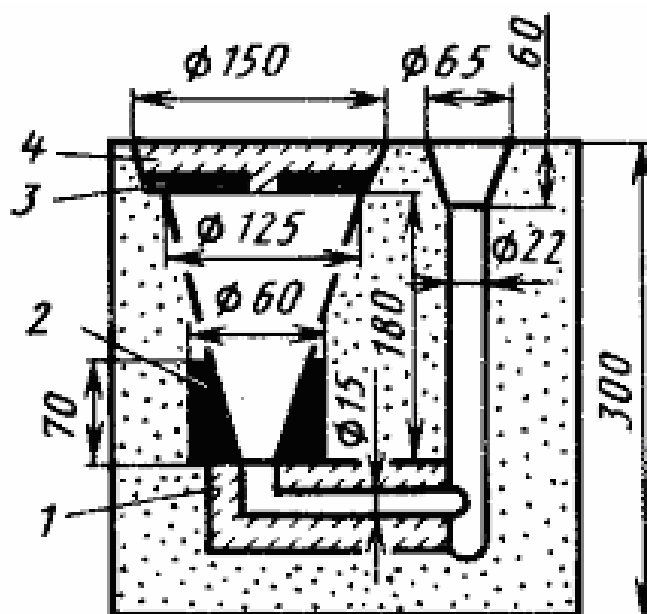


Рис. 5.35. Форма для получения проб на объемную усадку:
1, 4 – песчаные стержни; 2, 3 – холодильник

4. Отделить литниковую систему, из литника вырезать образец $10 \times 10 \times 10$ мм.

5. Определить плотность сплава. Для этого с поверхности образца удаляются риски, промывают его в ацетоне или спирте, взвешивают на аналитических весах (с точностью до 4-го знака) на воздухе и в воде. Расчет ведется по следующим формулам:

$$P_B - P_{\text{Ж}} = P_{\text{ВЫТ.Ж}}; \quad (5.14)$$

$$P_{\text{ВЫТ.Ж}} = V_{\text{ВЫТ.Ж}} \cdot \rho_{\text{Ж}}; \quad (5.15)$$

$$V_{\text{ВЫТ.Ж}} = \frac{P_{\text{ВЫТ.Ж}}}{\rho_{\text{Ж}}} = V_T, \quad (5.16)$$

где P_B и $P_{\text{Ж}}$ – масса тела в воздухе и в жидкости, кг; $P_{\text{ВЫТ.Ж}}$, $V_{\text{ВЫТ.Ж}}$ – масса и объем вытесненной жидкости, м^3 ; V_T – объем тела, м^3 .

Если используется дистиллированная вода ($\rho_{\text{Ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$), то объем погруженного тела численно равен весу вытесненной воды:

$$V_T = \frac{P_B - P_{\text{Ж}}}{1}, \quad (5.17)$$

откуда плотность тела

$$\rho_T = \frac{P_B}{V_T} = \frac{P_B}{P_B - P_{Ж}}. \quad (5.18)$$

6. Измерить объем V_{Π} пробы погружением ее в воду в мерной емкости и определить объемную усадку по выражению

$$\varepsilon_V = \frac{V_{\Pi.Ф} - V_{\text{Отл}}}{V_{\text{Отл}}} \cdot 100\% , \quad (5.19)$$

где ε_V – объемная усадка, %; $V_{\Pi.Ф}$ – объем полости формы, см^3 ; $V_{\text{Отл}}$ – объем отливки, см^3 .

7. Взвесить пробу.

8. Рассчитать общий объем усадочных пустот.

Отношение веса пробы и плотности сплава ρ_T характеризует объем сплава в пробе V_C :

$$V_C = \frac{G_{\Pi}}{\rho_T}, \quad (5.20)$$

где G_{Π} – масса (вес) конусной пробы, кг; ρ_T – плотность сплава при 20 °С, $\text{кг}/\text{см}^3$.

В то же время отливка имеет больший объем. Разность и составит объем усадочных полостей:

$$V_{\text{У.П}} = V_{\Pi} - V_C; \quad (5.21)$$

где $V_{\text{У.П}}$ – объем усадочных полостей, см^3 ; V_{Π} – объем полости конусной пробы, см^3 ; V_C – объем сплава в конусной пробе, см^3 .

9. Измерить объем открытой усадочной раковины V_P , заполнив ее керосином.

10. Рассчитать объем усадочных пор $V_{\text{У.ПОР}}$ по выражению

$$V_{\text{У.ПОР}} = V_{\text{У.П}} - V_P; \quad (5.22)$$

11. Результаты свести в таблицу 5.10 и сделать выводы.

12. Разрезать пробу от вершины до основания, изучить распределение усадочных пустот по сечению. Сделать эскиз.

13. Построить диаграмму «состав сплава – объемная усадка (концентрированная раковина и пористость)».

Таблица 5.10

Объемная усадка

Сплав	T_{Π} , °С	T_3 , °С	$V_{\Pi.Ф}$, м^3	V_{Π} , м^3	V_C , м^3	$V_{\text{У.П}}$, м^3	V_P , м^3

Содержание отчета.

1. Название работы, цель и оборудование
2. Описание методики определения усадочных пустот в отливках.
3. Экспериментальные данные и результаты их обработки.
4. Выводы.

Работа 5.3.3. Определение линейной и литейной усадок сплава

Цель работы. Освоить методики определения линейной и литейной усадок сплава.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь СШОЛ со стальным тиглем; потенциометр; термопара погружения ХА; ковш; модельная оснастка для получения проб на усадку; опоки; формовочный инструмент; лабораторные бегуны; штангенциркуль; чушки сплава АК12, формовочная смесь.

Порядок выполнения работы.

1. Подготовить рабочее место.
2. Набрать необходимую формовочную оснастку и инструмент.
3. Приготовить формовочную смесь.
4. Изготовить по три формы для определения линейной и литейной усадок литейного сплава.

Усадка линейная и литейная определяется по образцам. В простейшем варианте линейная усадка определяется по изменению размера прямого образца, литейная – по изменению образца с выступами (рис. 5.36).

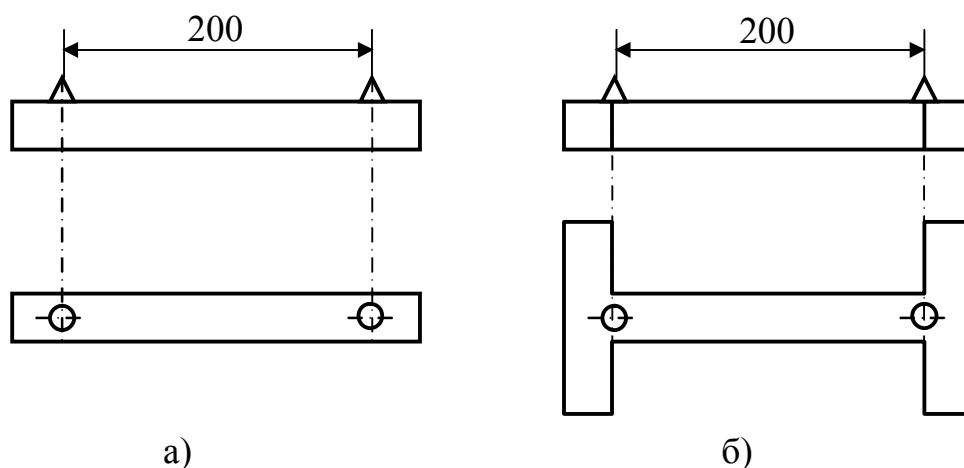


Рис. 5.36. Образцы для измерения усадки сплава:
а) линейной; б) литейной

5. Приготовить алюминиевый сплав перегретый до температуры 720 °С.

6. Залить формы сплавом, охладить отливки до комнатной температуры.

7. Очистить отливки от формовочной смеси и измерить расстояние между центрами выступов. Рассчитать величину относительной усадки по формуле

$$\varepsilon_{\text{Л}} = \frac{\ell_{\text{П.Ф}} - \ell_{\text{ОТЛ}}}{\ell_{\text{ОТЛ}}} \cdot 100\% , \quad (5.23)$$

где $\ell_{\text{П.Ф}}$ – линейный размер полости формы (модели), мм; $\ell_{\text{ОТЛ}}$ – линейный размер отливки, мм; $\varepsilon_{\text{Л}}$ – относительная линейная усадка, %.

8. Полученные результаты представить в виде табл. 5.11.

Таблица 5.11

Линейная ($\varepsilon_{\text{С}}$) и литейная ($\varepsilon_{\text{З}}$) усадка

Марка сплава	Номер опыта	$T_{\text{Пл}}$, °С	$T_{\text{Зал}}$, °С	$\varepsilon_{\text{С}}$, %	$\varepsilon_{\text{З}}$, %
	1				
	2				
	3				
Среднее значение:					

Содержание отчета.

1. Название работы, цель и оборудование.
2. Понятие и описание методики определения усадки сплавов.
3. Экспериментальные данные и результаты их обработки.
4. Выводы.

5.3.4. Определение термических напряжений в отливках

Цель работы. Изучение методики определения и расчет напряжений в отливках из различных сплавов.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь, гальванометр с термопарой, наждачный станок, модель усадочной решетки (рис. 5.37), комплекты опок, формовочный, плавильный и измерительный инструмент, ручная ножовка, металлическая, шихта и формовочная смесь.

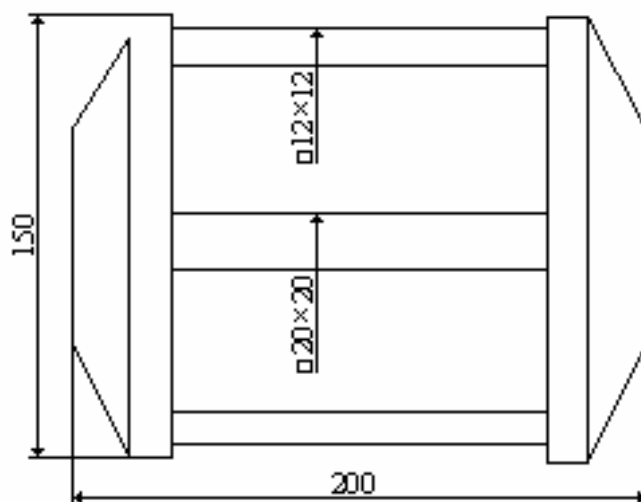


Рис. 5.37. Усадочная решетка для определения величины внутренних напряжений

Порядок выполнения работы.

1. По модели изготовить две-три формы усадочной решетки, подвод металла выполнить в торцовую часть центрального массивного бруса.
2. Приготовить сплав и залить в формы (состав сплава и температура заливки задается преподавателем).
3. После охлаждения отливки очистить от пригоревшей смеси, удалить заливки по плоскости разъема формы и на наждаке зачистить участки поверхности массивных брусьев длиной 15...20 мм.
4. На зачищенных участках нанести две поперечные риски на расстоянии 10...12 мм и измерить расстояние между ними с точностью $\pm 0,01$ мм.
5. Замерить размеры поперечных сечений брусьев решеток.
6. Разрезать массивный брус между нанесенными рисками и повторно измерить расстояние между ними.
7. Вычислить σ .

$$\sigma_2 = \frac{\delta E}{l} \left(\frac{2f_1}{f_2} + 1 \right), \quad (5.24)$$

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_2 f_2}{2f_1}, \quad (5.25)$$

где σ_1 и σ_2 – соответственно напряжение в тонком и толстом брусе, кг/мм²; f_1 и f_2 – соответственно площади сечений тонкого и толстого бруса, мм²; δ – деформация, мм; E – модуль упругости, кгс/мм²; l – длина тонких и толстого брусьев решетки, мм.

8. Данные измерений внести в таблицу 5.12 и вычислить доверительный интервал напряжений при вероятности 0,95.

Таблица 5.12

Результаты наблюдений и расчёт напряжений в отливках

Сплав	t, °C	Площадь сечения, мм ²		Расстояние между рисками, мм		Деформация δ, мм	Модуль упругости E·10 ⁻³ , кгс/мм ²	Внутреннее напряжение, кгс/мм ²	
		тонкого бруса	массивного бруса	до разрезки	после разрезки			в тонком брус	в массивном брус

Содержание отчета.

1. Название работы, цель и оборудование.
2. Описание методики проведения опытов.
3. Данные наблюдений и результаты расчета напряжений
4. Выводы.

Работа 5.3.5. Моделирование процесса кристаллизации отливки с определением объема усадочной раковины и скорости затвердевания

Цель работы. Получить наглядное представление о движении заливаемой жидкости в форму, о механизме затвердевания и роли направления теплоотвода в процессах формирования отливки.

Оборудование, инструмент и материалы: электроплитка, сосуд термостойкий (более 0,5 дм³), форма с прозрачной стенкой, горячая вода, гипосульфит, секундомер, линейка.

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с мерами по технике безопасности.
2. Расплавить гипосульфит.
3. Подготовить форму (промыть и собрать) в соответствии с заданием преподавателя и сделать эскиз (рис. 5.38).
4. Залить форму гипосульфитом.
5. Проследить за процессом затвердевания, измеряя толщину корочки через каждую минуту.
6. Занести измерения в таблица 5.13 и рассчитать коэффициенты затвердевания с двух сторон (K_1 и K_2).
7. Замерить усадочную раковину и рассчитать относительный объем ее.
8. Нарисовать эскиз полученной отливки.
9. Сделать вывод по проведенной работе.
10. Составить отчет.

Результаты измерения толщины твердой корочки

Время, мин	Толщина корочки, мм		K ₁	K ₂
	с левой стороны	с правой стороны		
1				
2				
3				
...	(полное затвердевание)			

Содержание отчета.

1. Название работы.
2. Сущность задания.
3. Описание эксперимента.
4. Таблица с замерахми корочки и результатами расчета K.
5. Указать размеры усадочной раковины, ее абсолютную и относительную величины.
6. Выводы.

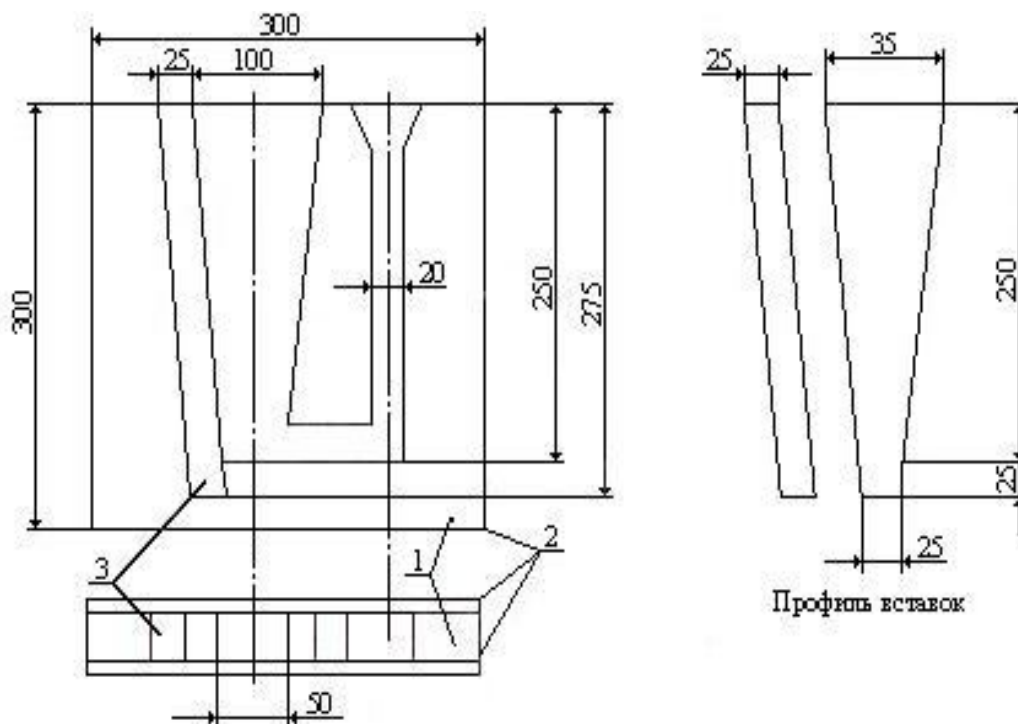


Рис. 5.38. Прозрачная модель литейной формы:
1 – модель формы; 2 – органическое стекло; 3 – съемная вставка

Работа 5.3.6. Исследование влияния химического состава стали на линейную усадку

Цель работы. Изучить ход усадки и экспериментально подтвердить теорию процесса усадки различных сплавов.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь, шихтовые материалы (армко-железо, ферромарганец, ферросилиций, чугун, алюминий), шлакообразующие (известь, боксит, плавиковый шпат), плавильный инструмент, разливочный ковш, установка для определения усадки (рис. 5.39), модель в виде прутка, пробки графитовые, кварцевые штоки, душник, термопары, формовочные материалы, бегуны.

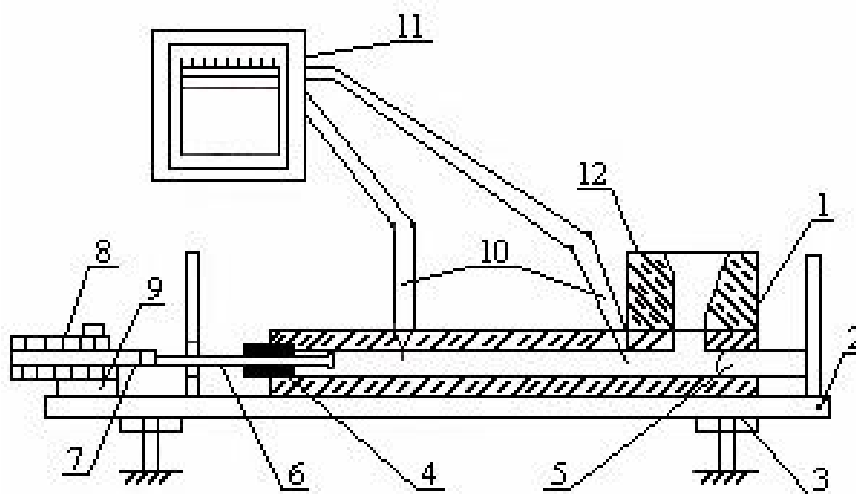


Рис. 5.39 Установка для определения линейной усадки литейных сплавов
1 – форма; 2 – плита; 3 – гайка регулировки уровня;
4 – подвижная пробка (из графита); 5 – пробка неподвижная, водоохлаждаемая;
6 – кварцевый шток; 7 – сердечник датчика; 8 – датчик перемещений;
9 – подставка для закрепления датчика; 10 – термопары;
11 – потенциометр; 12 – воронка

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с мерами по технике безопасности.
2. Подготовить установку (см. рис. 5.39).
3. Изготовить форму из песчано-глинистых смесей.
4. Установить форму на плиту и поставить термопары, закрепив их обжатием смеси.
5. Установить пробку сначала металлическую, а затем графитовую вместе с кварцевым штоком, скрепленным с ферромагнитным сердечником.
6. Запустить потенциометр, отрегулировав начальные показания.

7. Установить воронку.
8. Приготовить сплав заданного состава (по указанию преподавателя) и залить в форму при работавшем потенциометре.
9. Охладить до комнатной температуры, контролируя показания прибора.
10. Разобрать установку, выбить отливку и установить в исходное состояние.
11. Расшифровать диаграмму и записать расчеты в таблицу 5.14.
12. Построить график и рассчитать характерные участки с определением α , $t_{н.к}$ и температур начала и конца превращений.
13. Сделать вывод по результатам исследований.

Таблица 5.14

Параметр	Значения фиксируемых параметров после заливки через τ , мин									
	0	1	2	3	4	5	10	20	30	40
$t, ^\circ\text{C}$										
Π , мм										
$\Delta l = \frac{\Pi}{M}$, мм										
$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100 \%$										

Примечания: Π – показания прибора, мм; M – масштаб (увеличение прибором действительных изменений пробы). L – первоначальная длина канала, равная длине формы с вычетом длины частей пробок, входящих в полость. В местах перегибов характеристики снимать обязательно.

Содержание отчета.

1. Название работы.
2. Сущность задания.
3. Описание эксперимента с эскизом формы.
4. Таблица с параметрами и расчетом ε .
5. График зависимости $\varepsilon - t$.
6. Выводы.

Работа 5.3.7. Определение склонности сплавов к образованию трещин при затрудненной усадке

Цель работы. Ознакомление с методикой определения склонности сплавов к образованию трещин при затрудненной усадке и изучение изменения трещиностойчивости в зависимости от состава сплавов.

Оборудование, инструменты, материалы: плавильная печь, прибор Н.А. Трубицына для определения склонности сплавов к образованию трещин при затрудненной усадке (рис. 5.40), потенциометр с термопарой, опоки и модельный комплект, бинокулярная лупа, формовочный, плавильный и мерительный инструмент, металлическая шихта и формовочная смесь.

Порядок проведения работы.

1. Изготовить 3–4 формы для определения трещиноустойчивости.
2. Подключить потенциометр для автоматической записи температуры и нагрузки, которую испытывает, образец при затрудненной усадке.
3. Выплавить сплав заданного состава и залить формы. Заливку проводить при одинаковом перегреве.
4. Охладить отливки до 50 °С и извлечь их из форм.
5. Осмотреть образцы через бинокулярную лупу
6. Собрать формы и установить их в рабочее положение.

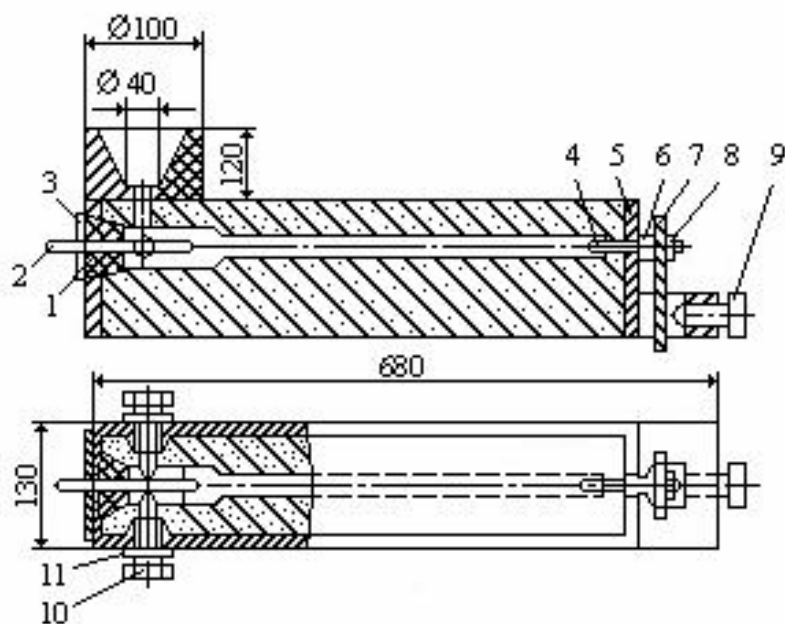


Рис. 5.40. Схема прибора для определения склонности сплавов к образованию трещин при затрудненной усадке:
 1 – пробка; 2 – термопара; 3 – отверстие; 4 – шпилька-тяги;
 5 – опока; 6, 8 – гайки; 7 – пружина; 9, 10 – болты; 11 – прилив.

Результаты наблюдений и их обработка.

1. Результаты опытов внести в рабочий журнал. Провести статистическую обработку результатов опытов.
2. По данным потенциограмм и тарировочному графику пружины построить графики изменения температуры образца и нагрузки в зависимости от времени охлаждения.

3. Определить температуру, время образования трещины и нагрузку, вызвавшую ее образование.

4. Используя данные, полученные для других составов сплава, построить график изменения трещиностойкости в зависимости от состава сплавов.

Содержание отчета.

1. Краткие сведения о методике проведения эксперимента.
2. Схема установки.
3. Результаты опытов. Графики.
4. Выводы.

Работа 5.3.8. Определение минимальной трещиностойкости сплавов

Цель работы. Изучить трещиностойкость литейных сплавов.

Оборудование, инструмент, материалы: плавильная печь, шихтовые материалы (отходы углеродистой стали, ферросплавы и бой электродов или чугун), шлакообразующие материалы (известь, боксит, плавиковый шпат), плавильный инструмент, разливочный ковш, специальная опока с раздвижными упорами, разъемная модель пробы, модели стояка и воронки, термопары с потенциометром, формовочные материалы, бегуны.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 5.41.

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с мерами по технике безопасности.
2. Подготовить опоку и установить в нее модель пробы.
3. Приготовить формовочную смесь.
4. Изготовить форму.
5. Установить термопары так, чтобы скрутка была равноудалена от стенок и проверить их работу.
7. Установить крышки с торцов формы.
8. Установить воронку.
9. Залить металл с включением потенциометра.
10. Выдержать пробу в форме в течение 40...50 мин.
11. Отключить потенциометр.
12. Откусить термопары кусачками.
13. Снять крышки.
14. Вынуть упоры.
14. Выбить пробу.
15. Осмотреть и записать результаты осмотра в журнал.
16. Расшифровать диаграмму и занести данные температур в табл. 5.15

17. Рассчитать значения m_2 в пределах 10 мин охлаждения, построить график $m_2 - t$ и убедиться в его возрастании.
18. Сделать вывод (по значению m_2 , и результату осмотра пробы).
19. Составить отчет.

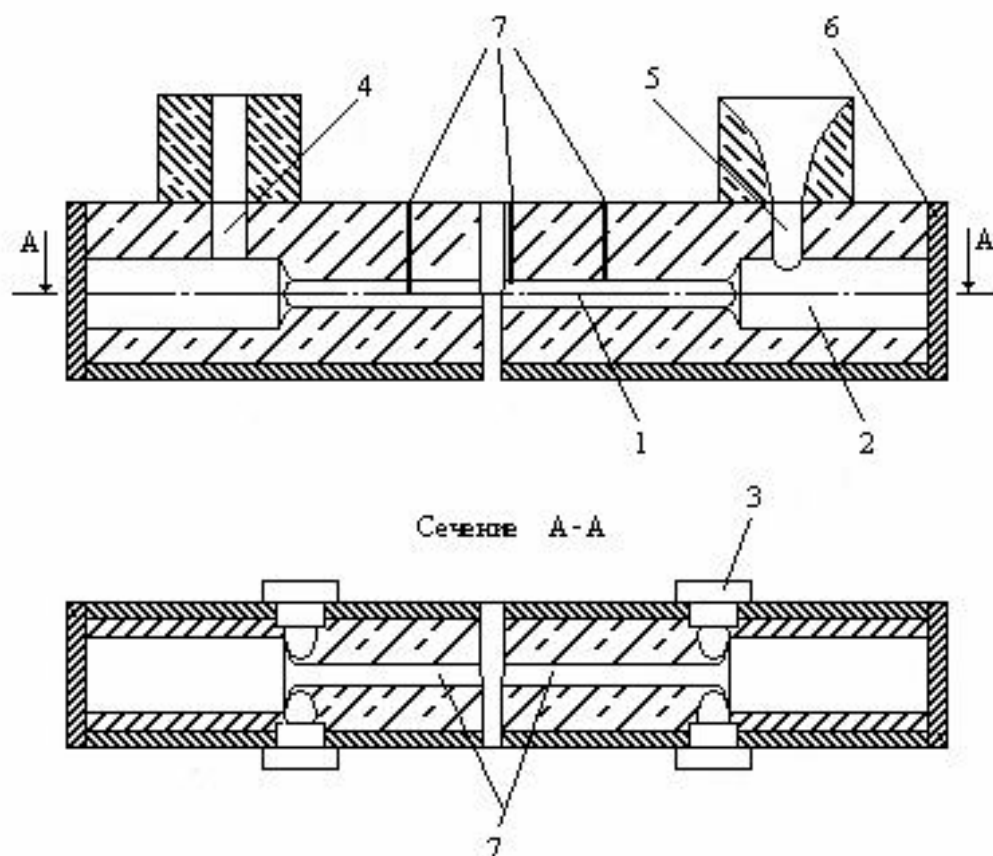


Рис. 5.41. Схема установки для изучения трещиностойкости сплавов:
 1 – опытная отливка (проба); 2 – утолщенная часть пробы; 3 – упоры съёмные;
 4 – выпор; 5 – воронка; 6 – отъемная стенка опоки; 7 – термопары

Таблица 5.15

Экспериментальные данные

t , мин	Температура, °C		$t_{\text{ну}} - t$		m_2
	t_x	t_2	Δt_x	Δt_2	
0					
1					
2					
3					
4					
5					
10					

Содержание отчета.

1. Название работы.
2. Сущность задания.
3. Описание эксперимента с эскизом формы.
4. Таблица расчета m .
5. График зависимости $m - t$.
6. Выводы.

Работа 5.3.9. Определение склонности сплава к образованию горячих трещин

Цель работы. Практическое освоение навыков определения сравнительной трещиноустойчивости сплавов.

Общие сведения. Определение склонности сплава к образованию горячих трещин при затрудненной усадке производится обычно с помощью технологических проб. Например, для алюминиевых, магниевых и некоторых других сплавов применяется проба по ширине кольца – метод Спектровой С.И. и Лебедевой А.А. По этому методу в песчано-глинистой форме формируются полости для двух колец $\varnothing 108$, высотой 5 мм. Внутренняя часть кольца выполняется металлическим стержнем. Изменяя диаметр этого стержня, можно изменить ширину кольца от 5 до 42,5 мм. Комплект металлических стержней позволяет изменять ширину колец через 2,5 мм. Металлический стержень создает очень большое препятствие усадке кольцевой отливки и при недостаточной прочности сплава при температурах усадки в ней возникает горячая трещина. Установкой нового (следующего по порядку) металлического стержня следует увеличить ширину кольца до следующего размера и заново изготовленную форму вновь залить металлом. Такие определения следует выполнять до установления границы – ширины, при которой трещин на кольце не наблюдается. Поэтому критерием горячеломкости сплава является ширина кольца (или площадь сечения), при которой возникает первая трещина. Следовательно, чем шире кольцо, тем больше горячеломкость сплава, а чем уже, тем она меньше. В значительной степени горячеломкость зависит от свойств сплава: его интервала кристаллизации, от усадки и скорости нарастания усадки, механической прочности и пластичности сплава в интервале температур кристаллизации. Обычно сохранение большого количества сплава в жидком состоянии при температурах, близких к t_c , делает его устойчивым к горячим трещинам.

В методе Спектровой С.И. и Лебедевой А.А. специально предусматривается неравномерное охлаждение за счет установки плоского холодильника на половине кольца, противоположной литнику. Два кольца заформи-

ываются с разными диаметрами металлических стержней и этим сокращается количество опытных заливок. Сплавы заливаются с одинаковым перегревом над $t_{л}$ – обычно 80...60 °С. Напор выполняется постоянным – 120...140 мм. При выполнении работы формы проб на трещиностойчивость следует изготовить по имеющейся оснастке из песчано-глинистых смесей. После заливки ($t_{зал}$ указывается преподавателем) отливки следует охладить до 60...90 °С, выбить, очистить и просмотреть под лупой $\times 10...20$, выявить трещины.

Оборудование, инструмент, материалы: Плавильная печь, плавильный инструмент, бегуны лабораторные, оснастка опочная и модельная, лупа $\times 10$, формовочный инструмент, шихта для сплавов АК12, АК4, АК7ч, формовочная смесь.

Порядок выполнения работы.

1. Приготовить два сплава (по указанию преподавателя) в количестве 5 кг каждого.
2. Изготовить две одинаковые серии форм-проб на трещиностойчивость с разной шириной кольца-пробы.
3. Каждую серию форм залить приготовленными сплавами.
4. Отливки охладить до 60...90 °С, выбить, очистить от формовочной смеси и осмотреть через лупу № 10–20. Результаты осмотра занести в табл. 5.16, пометив наличие трещин знаком «+» (есть) и «-» (нет).
5. Используя данные других подгрупп, сделать вывод о сравнительной трещиностойчивости сплавов.

Таблица 5.16

Трещиностойчивость сплавов

Сплав	Обработка	Номер кольца	Ширина кольца, мм	Наличие или отсутствие трещин
1	2	3	4	5

Содержание отчета.

1. Название работы.
2. Сущность задания.
3. Описание эксперимента с эскизом формы.
4. Таблица с номерами колец.
5. Выводы.

Работа 5.3.10. Изучение основ ультразвуковой дефектоскопии твердых тел с использованием УДЗ-103 «PELENG»

Цель работы. Изучить основные понятия, применяемые при ультразвуковом контроле твердых тел, ознакомиться с органами управления электронного блока и системой меню УДЗ-103 «PELENG», провести контроль однородности внутренней структуры металлического образца.

Материалы и оборудование: УДЗ-103ВД «PELENG», штангенциркуль ШЦ 300-0.05, станок обдирочно-шлифовальный 332Г, масло машинное, стандартный образец СО-1, цилиндрический стальной объект контроля.

Общие сведения.

Неразрушающим контролем (НК) называют технический контроль, при котором не нарушается пригодность объекта к применению. Ультразвуковая (УЗ) дефектоскопия является одним из методов НК и за последние годы объем её применения по отношению к другим видам НК достиг 70-80%. УЗ дефектоскопию применяют для проверки соответствия качества продукции, её свойств и характеристик требованиям заказчика. Основные принципы данного вида контроля сформулировал профессор Соколов С.Я. в 1928 году. К плюсам УЗ дефектоскопии можно отнести более высокую чувствительность пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП), лучшую выявляемость трещиноподобных дефектов, высокую оперативность, меньшую стоимость и безопасность для здоровья оператора. Данный вид НК позволяет обнаруживать не только литейные дефекты, но и дефекты проката, сварных соединений и механической обработки с размерами 1 до 30 мкм.

УЗ дефектоскоп – это электронно-акустическое устройство, предназначенное для возбуждения-приема УЗ колебаний и преобразование их в вид, удобный для вывода на соответствующий индикатор, снабженный сервисным устройством для измерения параметров принятых сигналов. Узел прибора, отвечающий за преобразование электрической энергии в акустическую и обратно, принцип работы которого основан на пьезоэлектрическом эффекте называется пьезоэлектрическим преобразователем.

ПЭП классифицируются по следующим признакам:

- по типу волны, возбуждаемой в объекте контроля (преобразователи продольных, сдвиговых поверхностных и др. волн);
- по углу ввода УЗ волны в изделие (прямые и наклонные);
- по способу размещения функций излучения и приема УЗ волн (совмещенные, отдельно-совмещенные);
- по способу осуществления акустического контакта (контактные и иммерсионные).

Для каждого вида ПЭП существует понятие «мертвой зоны», т.е. такого участка предповерхностной области изделия со стороны установки ПЭП, в которой дефекты данного размера не могут быть выявлены испытательной системой. Размер мертвой зоны при контроле прямым и наклонным преобразователями зависит от:

- длительности электрического импульса $\tau_{и}$, поступающего на пьезоэлемент с генератора импульсов возбуждения;
- конструкции и характеристик ПЭП. Степень демпфирования пьезоэлемента влияет на длительность его свободных колебаний τ_c после окончания воздействия электрического импульса.

Зная τ_c и $\tau_{и}$ можно произвести оценку мертвой зоны для прямого ПЭП:

$$M = C_1 \cdot (\tau_c + \tau_{и}) / 2 \quad (5.26)$$

Поскольку реальные дефекты отличаются от идеальных, то при одинаковой амплитуде эхоимпульсов от несплошности и искусственного отражателя их геометрические размеры отличаются. Поэтому в УЗ дефектоскопии, при характеристике геометрических размеров выявленных дефектов, используют понятие эквивалентного размера, получаемого путём соотношения эхоимпульсов от стандартного образца СО-2 и найденного дефекта в исследуемой детали. Надёжность и бесперебойная работа ПЭП зависит от качества подготовки исследуемой поверхности, стабильности акустического контакта, постоянства слоя контактной жидкости и скорости сканирования.

Порядок выполнения работы:

1. Подключить блок питания и включить прибор. Убедиться, что на экране появилась надпись «вас приветствует универсальный дефектоскоп «PELENG» УДЗ-103ВД». Ознакомиться с основными пунктами меню «Режим работы», расположенного справа от надписи, пролистывая его с помощью кнопок $\uparrow \downarrow$ на панели прибора.

2. Подключить совмещенный иммерсионный ПЭП прямого действия. В пункте меню «Вызов настройки» кнопками \leftarrow и \rightarrow на панели прибора выбрать настройку номер 009 и вызвать её нажатием кнопки «ВВОД»

3. С помощью штангенциркуля замерить геометрические размеры стандартного стального образца, после чего на зачищенную поверхность нанести небольшое количество машинного масла и плотно прижав ПЭП к образцу зафиксировать «донный сигнал». При этом на экране дефектоскопа должен появиться характерный пик и в верхней строке экрана рядом с символом «X» отобразится значение толщины образца, которое должно совпадать с ранее измеренной штангенциркулем в величину. Начать сканирование образца, медленно передвигая ПЭП от одного его конца к другому и фиксировать значения глубины залегания дефектов отображаемые на экране.

4. На цилиндрическом стальном образце с помощью обдирочно-шлифовального станка подготовить две параллельные площадки. После чего в меню УДЗ-103 «PELENG» вызвать настройку 003 (см.п.2) и просканировать образец с двух сторон (см. п. 3). Результаты сканирования отобразить в виде эскиза.

Содержание отчета.

1. Название работы, цель и оборудование.
2. Краткое описание теории.
3. Эскиз интерфейса прибора с обозначением дефекта на его панели.
4. Эскиз образца и его дефектограмму.
5. Выводы.

6. ГАЗОВЫЙ РЕЖИМ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ

6.1. Общие сведения

Под газовым режимом литейной формы понимается комплекс одновременно протекающих процессов: газовой выделения, химических реакций с участием газов, фильтрации газов через поры литейной формы или движения их через жидкий металл [3].

Газовый режим формы оказывает существенное влияние на формирование качества отливок. В частности, на возможность предупреждения образования ужимин, пригара, вскипа, газовых раковин. Его расчет является необходимой предпосылкой к разработке мероприятий по повышению качества отливок.

Порядок расчета газового режима литейной формы состоит в следующем:

- определение критического значения давления газов ($P_{кр}$), при превышении которого газы проникают из формы в металл;
- расчет кинетической зависимости давления газов на границе металл-форма от времени ($P_{ф} = f(\tau)$);
- проверка условия оптимальной направленности газового потока ($P_{ф} < P_{кр}$), вывод о вероятности образования газовых раковин в отливке, разработка обоснованных расчетом мероприятий по предотвращению указанного брака отливок.

Критическое значение давления газов $P_{кр}$ вычисляется как сумма металлостатического ($P_{м}$) и капиллярного ($P_{к}$) давлений металла, оказываемых на форму [3]:

$$P_{кр} = P_{м} + P_{к}, \text{ Па} . \quad (6.1)$$

Металлостатическое давление P_M определяется по формуле

$$P_M = \gamma g H, \text{ Па}, \quad (6.2)$$

где γ – плотность металла (расплава), кг/м^3 ; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; H – высота столба металла, м.

Для расчета капиллярного давления P_K металла в порах формы может быть использована формула Жюрена:

$$P_K = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \text{ Па}, \quad (6.3)$$

где σ – поверхностное натяжение металла (расплава), Н/м ; θ – краевой угол смачивания расплавом материала формы, град; r – эффективный радиус пор формы, м.

Кинетическое уравнение изменения избыточного (сверх атмосферного) давления газов P_Φ на границе металл-форма со временем имеет вид [5]:

$$P_\Phi = \frac{a\Sigma(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_3})}{MV + (\tau - \tau_3)K \frac{F_{\text{ПП}}}{l}}, \text{ Па}, \quad (6.4)$$

где a – удельный коэффициент газовыделения, $\text{м/с}^{1/2}$; Σ – полная площадь поперечного сечения фильтрационного потока, включая сечение твердых частиц, м^2 ; τ_3 – продолжительность заливки расплава, с; τ – время от начала заливки, с; M – коэффициент, учитывающий начальное давление газов в порах формы, $M \approx 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{Н}$; V – объем пор в форме, м^3 ; K – газопроницаемость смеси, $\text{м}^4/(\text{Н} \cdot \text{с})$; l – длина пути фильтрации газов, м.

Для расчета газопроницаемости смеси K , ед. может быть использована следующая эмпирическая формула [3]:

$$K = 1900 d_H^{1,8}, \text{ ед.}, \quad (6.5)$$

где d_H – средний размер зерен наполнителя, мм.

Перевод газопроницаемости смеси из условных единиц, принятых в литейном производстве, в единицы СИ можно осуществить, исходя из равенства [3]

$$1 \text{ м}^4/(\text{Н} \cdot \text{с}) = 588 \cdot 10^5 \text{ см}^4/(\text{Г} \cdot \text{мин}) = 588 \cdot 10^5 \text{ ед.}$$

Оптимальная продолжительность заливки τ_3 может быть определена по формуле [2, 3]

$$\tau_3 = S\sqrt[3]{\delta m}, \text{ с}, \quad (6.6)$$

где S – коэффициент, продолжительность заливки формы; δ – преобладающая толщина стенки отливки, мм; m – масса отливки, кг.

Выражение (6.4) является частным решением общего закона фильтрации Дарси, согласно которому поток жидкости или газа пропорционален градиенту давления $\frac{dp}{dx}$ [5]:

$$dV = -D \frac{dp}{dx} \cdot \frac{1}{\gamma} \Sigma d\tau, \quad (6.7)$$

где dV – объем жидкости или газа, профильтрованный за время $d\tau$ под действием градиента давления $\frac{dp}{dx}$, m^3 ; γ – удельный вес фильтрата, N/m^3 ;

D – коэффициент фильтрации Дарси, m/c ; Σ – полная площадь сечения фильтрационного потока, m^2 .

Анализ уравнения (6.4) показывает, что газовый режим литейной формы определяется главным образом ее газотворностью и газопроницаемостью в их взаимодействии.

Под газотворностью формы понимается ее способность образовывать газы при нагреве. Физический смысл газопроницаемости состоит в возможности формы пропускать эти газы через себя. Необходимо четко представлять, что можно заливать металл в форму с практически нулевой газопроницаемостью при условии ее «нулевой» газотворности и возможности свободного выхода воздуха из полости формы, обеспечивая отсутствие газов в отливке.

Газотворность и газопроницаемость смесей определяется экспериментально на соответствующих образцах и приборах.

Если при расчете газового режима формы выявлено несоблюдение условия оптимальной направленности газового потока от металла к форме, следует задействовать технологические факторы, снижающие газотворность смеси (уменьшение содержания связующего, замена его на менее газотворное, применение наполнителя с меньшей теплоаккумулирующей способностью и т.д.) и (или) повышающие ее газопроницаемость (использование более крупнозернистого наполнителя, уменьшение толщины стержня, вентиляционные каналы и т.п.). Затем повторным расчетом показать эффективность указанных мероприятий, определить из их числа организационно приемлемые для конкретных условий производства с целью снижения брака отливок по газовым раковинам.

6.2. Варианты контрольного задания

Задание 6.2.1. Расчет газового режима литейной формы

Рассчитать газовый режим литейных форм в соответствии с вариантами задания, представленными в табл. 6.1. Расчет произвести для форм из песчано-глинистой (сырой), жидкостекольной, смоляной смесей со средним

размером зерен кварцевого песка $(0,16; 0,2; 0,315; 0,4) \cdot 10^{-3}$ м. Результаты расчетов представить в виде зависимости $P_{\Phi} = f(\tau)$, варьируя время τ от 20 до 60 с с шагом 10 с. Сделать вывод о влиянии типа смеси и размера зерен наполнителя на газовый режим литейных форм. При расчетах принять равными: $S = 2$; $r = d_{\text{H}}/2$; $\theta = 115^{\circ}$; удельные коэффициенты газовыделения $a \cdot 10^3$, м/с^{1/2}:

для песчано-смоляной смеси – 23,2;

для песчано-глинистой сырой смеси – 6,8;

для песчано-жидкостекольной смеси – 4,8.

Значения σ ; γ для соответствующих сплавов могут быть взяты из приложения 1.

Таблица 6.1

Варианты задания 6.2.1

№ варианта	Тип сплава	$H_{\text{отл}}$, м	$\delta \cdot 10^3$, м	$m_{\text{отл}}$, кг	$\Sigma \cdot 10^2$, м ²	$F_{\text{пр}} \cdot 10^2$, м ²	l , м	$V \cdot 10^2$, м ³
Пример	Углеродистая сталь	0,25	5	1,6	6	1,8	0,2	0,24
6.1	Углер. сталь	0,25	8	2,0	8	2,4	0,3	0,8
6.2	Углер. сталь	0,5	10	2,5	9,5	3,0	0,5	4
6.3	Углер. сталь	1,0	10	4,0	15	4,5	0,7	10
6.4	Углер. сталь	1,0	15	10	30	9,0	0,85	18
6.5	Серый чугун	0,25	8	2,0	5	1,5	0,25	0,45
6.6	Серый чугун	0,40	12	2,5	7	2,1	0,40	2
6.7	Серый чугун	0,60	13	3,0	9	2,7	0,55	5
6.8	Серый чугун	1,0	25	6,0	18	6,0	1,0	30
6.9	Серый чугун	0,8	20	12,0	56	15,0	1,5	105
6.10	Алюминиевый	0,25	7	1,6	3	90	0,3	80
6.11	Алюминиевый	0,30	12	2,0	5,5	1,5	0,8	15
6.12	Алюминиевый	0,40	5	2,5	4,5	1,2	0,4	2
6.13	Алюминиевый	1,0	18	3,0	8,0	2,4	1,5	105
6.14	Алюминиевый	1,5	20	4,0	9,3	2,7	1,8	180
6.15	Углеродистая сталь	0,4	20	14	50	20	1,0	30
6.16	Легир. сталь (20X13НЛ)	0,5	15	15	20	7	0,3	50
6.17	Легир. сталь (20X13НЛ)	0,6	17	30	22	10	0,6	58
6.18	Легир. сталь (20X13НЛ)	0,55	16	23	24	8	0,5	54
6.19	Легир. сталь (20X13НЛ)	0,7	18	28	26	11	0,57	60

№ варианта	Тип сплава	$H_{отл}, м$	$\delta \cdot 10^3, м$	$m_{отл}, кг$	$\Sigma \cdot 10^2, м^2$	$F_{пр} \cdot 10^2, м^2$	$l, м$	$V \cdot 10^2, м^3$
6.20	Легир. сталь (20Х13НЛ)	0,8	20	30	30	12	0,6	80
6.21	Бронза	0,15	10	2	10	3	0,1	5
6.22	Бронза	0,3	12	4	13	5	0,3	10
6.23	Бронза	0,38	14	6	16	7	0,5	15
6.24	Бронза	0,42	15	7	17	8	0,8	18
6.25	Бронза	0,5	18	10	20	10	0,6	20
6.26	Оловянный	0,2	13	10	20	7	0,2	30
6.27	Оловянный	0,25	15	12	25	10	0,3	38
6.28	Оловянный	0,3	17	15	30	15	0,5	48
6.29	Оловянный	0,35	20	20	40	18	0,6	55
6.30	Оловянный	0,4	22	30	50	20	0,8	60

Пример выполнения задания 6.2.1 (вариант «Пример»).

Определяется металлостатическое давление расплава углеродистой стали по формуле (6.2):

$$P_M = 9,8 \cdot 7200 \cdot 0,25 = 17640 \text{ Па.}$$

Капиллярное давление расплава по формуле (6.3)

$$P_K = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot \cos 115^\circ}{0,2 \cdot 10^{-3}} = -6,3 \cdot 10^3 \text{ Па.}$$

Критическое давление газов в форме, при превышении которого газы проникают в металл, по формуле (6.1)

$$P_{KP} = 17640 - 6300 = 11340 \text{ Па.}$$

Результаты расчетов критического давления газов в зависимости от размера зерен наполнителя формы представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты расчетов критического давления газов в форме

$d_H \cdot 10^3, м$	$r \cdot 10^3, м$	$-P_K, Па$	$P_{KP}, Па$
0,4	0,2	6300	11340
0,315	0,16	7900	9740
0,2	0,1	12700	4940
0,16	0,08	15900	1740

Оптимальная продолжительность заливки по формуле (6.6)

$$\tau_3 = 2\sqrt[3]{5 \cdot 1,6} = 4 \text{ с.}$$

Газопроницаемость формы по формуле (6.5)

$$K = 1900 \cdot (0,4)^{1,8} = 365 \text{ ед. или } K = 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4/(\text{Н} \cdot \text{с}).$$

Давление газов на границе металл-форма по формуле (6.4)

а) форма из песчано-смоляной смеси:

$$P_{\Phi} = \frac{23,2 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-2} (\sqrt{20} - \sqrt{4})}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,24 \cdot 10^{-2} + (20 - 4) \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1,8 \cdot 10^{-2}}{0,2}} = 385 \text{ Па.}$$

б) форма из песчано-глинистой (сырой) смеси:

$$P_{\Phi} = \frac{6,8 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-2} (\sqrt{20} - \sqrt{4})}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,24 \cdot 10^{-2} + (20 - 4) \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1,8 \cdot 10^{-2}}{0,2}} = 113 \text{ Па.}$$

в) форма из песчано-жидкостекольной смеси:

$$P_{\Phi} = \frac{4,8 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-2} (\sqrt{20} - \sqrt{4})}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,24 \cdot 10^{-2} + (20 - 4) \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1,8 \cdot 10^{-2}}{0,2}} = 81 \text{ Па.}$$

Результаты расчетов давления P_{Φ} на границе металл-форма в зависимости от типа смеси, размера зерен наполнителя и времени приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты расчетов давления газов на границе металл-форма

Тип смеси	$d_H \cdot 10^3, \text{ м}$	$P_{\Phi}, \text{ Па}$ при различных $\tau, \text{ с}$				
		20	30	40	50	60
Песчано-смоляная	0,4	385	333	300	275	256
	0,315	596	517	464	426	397
	0,2	1339	1160	1043	958	892
	0,16	1944	1686	1516	1393	1297
Песчано-глинистая сырая	0,4	113	98	88	81	76
	0,315	175	153	137	126	117
	0,2	393	343	307	282	263
	0,16	571	498	446	410	383
Песчано-жидкостекольная	0,4	81	70	62	57	53
	0,315	125	108	96	89	83
	0,2	280	242	217	200	186
	0,16	407	352	315	290	271

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением размеров зерна наполнителя давление газов ($P_{\text{ф}}$) на границе «металл–форма» уменьшается. Максимальным $P_{\text{ф}}$ обладает песчано-смоляные смеси. С позиций образования газовых раковин в отливке для этого типа смеси «опасным» является использование наполнителя с размером зерна $0,16 \cdot 10^{-3}$ м, поскольку при заданных условиях в течение 20 с с момента заливки расплава давление газов в форме ($P_{\text{ф}} = 1944$ Па) превышает критическое значение ($P_{\text{кр}} = 1740$ Па).

6.3. Лабораторные работы

6.3.1. Изучение влияния добавок пылевидного кварца на газопроницаемость песчано-глинистых смесей

Цель работы. Изучить влияние добавок пылевидного кварца на газопроницаемость сырых песчано-глинистых смесей.

Оборудование, инструмент, материалы: лабораторные бегуны, лабораторный копер, технические весы с разновесами, прибор для определения газопроницаемости, предела прочности при сжатии и растяжении смеси, секундомер, металлическая гильза с поддоном, выталкиватель, специальная гильза для определения газопроницаемости сухого образца, мензурка, коробка для смесей, сухой песок, формовочная глина, пылевидный кварц, формовочная смесь.

Порядок выполнения работы.

1. Приготовить формовочную смесь Она составляется из 100 массовых частей кварцевого песка, 12 массовых частей формовочной глины, 5 массовых частей воды и переменного содержания ПК (табл. 6.4). Для сравнения один состав формовочной смеси не содержит ПК. Порядок перемешивания материалов: песок кварцевый – ПК – формовочная глина – вода. Время перемешивания – 6 минут.

Таблица 6.4

Составы смесей с пылевидным кварцем

Составляющие смеси	Содержание в смеси, массовые %			
	1	2	3	4
Песок кварцевый	100	100	100	100
Формовочная глина	12	12	12	12
Вода	5,0	5,0	5,0	5,0
Пылевидный кварц	–	5,0	10,0	15,0

Примечание. Формовочная глина, вода и ПК даются в смесь сверх 100 %.

2. Изготовить экспериментальные образцы и измерить их газопроницаемость. По каждому составу смеси провести не менее 3-х измерений.

3. Определить статистические параметры: среднеарифметические значения измеренных величин, соответствующие дисперсии и доверительные интервалы и уравнения регрессий.

4. Определить среднее арифметическое значение газопроницаемости и результаты занести в таблицу 6.5.

5. Построить графическую зависимость газопроницаемости смесей от содержания в них пылевидного кварца.

Таблица 6.5

Результаты опытов

Индекс смеси	Содержание пылевидного кварца, %	Газопроницаемость, ед.			
		1	2	3	\bar{K}
1	—				
2	5,0				
3	10,0				
4	15,0				

Содержание отчета.

1. Наименование работы, цель и оборудование.
2. Описание методики проведения экспериментов.
3. Таблицу опытных данных и результатов их обработки.
4. График зависимости газопроницаемости смеси от содержания пылевидного кварца.
5. Выводы.

7. ПРИГАРООБРАЗОВАНИЕ НА ОТЛИВКАХ

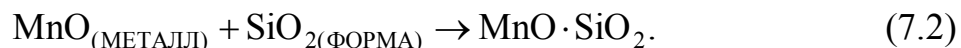
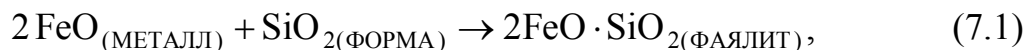
7.1. Общие сведения

Большинство литейных форм, исключая металлические, имеют пористое строение. Жидкий металл повторяет внутренние очертания формы и стремится проникнуть в ее поры под действием капиллярных сил (в случае смачиваемости расплавом материала формы) и металлостатического напора. Факторами, препятствующими проникновению металла в поры формы, являются газовое давление в форме и низкая температура ее прогрева [2, 3].

При условии капиллярной пропитки расплав скрепляет частицы формовочной смеси, образуя пригар, ухудшающий качество поверхности отливок. В результате значительно возрастают трудоемкость операции их зачистки и в целом себестоимость производства отливок [2].

Принято классифицировать пригар на механический, вызванный воздействием давления расплава на форму, и химический, связанный с физико-химическим взаимодействием жидкого металла с материалом формы.

В частности, при производстве отливок из чугуна и стали в условиях окислительной атмосферы кварцевой формы возможны реакции [3]



В поры литейной формы проникают образующиеся продукты химического взаимодействия формы и жидкого металла, обладающие по сравнению с исходным расплавом более низкой температурой плавления (1478...1493 К), повышенной жидкотекучестью при высоких температурах прогрева формы жидким чугуном или сталью (1573...1773 К), смачиваемостью кварцевого материала формы [4].

Учитывая, что материал литейной формы выбирается, исходя из условия его несмачиваемости заливаемым металлом ($\theta > 90^\circ$), появление на границе металл-форма легкоплавких силикатов, смачивающих кварцевый наполнитель формы ($\theta < 90^\circ$), вызывает изменение направления действия капиллярных сил, обеспечивающее движение расплава силикатов вглубь формы.

Деление пригара на механический и химический достаточно условно, на практике имеют место оба его вида одновременно.

Проникновение продуктов реакций на границе металл-форма является сложным физико-химическим процессом, подчиняющимся с одной стороны законам гидравлики, с другой – теплофизики.

Изучение гидродинамики процесса капиллярного проникновения расплавов основывается на применимости для характеристики течения жидкости в поровых каналах литейной формы закона Пуазейля [3]:

$$q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 B h \eta}, \quad (7.3)$$

где q – расход, $\text{м}^3/\text{с}$; r – эффективный радиус пор, м ; h – глубина проникновения расплава, м ; ΔP – градиент давления, Па ; η – динамическая вязкость расплава, $\text{Па}\cdot\text{с}$; B – коэффициент извилистости поровых каналов, $B = 1,58...1,74$.

В случае течения расплава под действием капиллярных сил в горизонтальном поровом канале ΔP определяется по формуле

$$\Delta P = P_K - P_\Gamma, \quad (7.4)$$

где P_K – капиллярное давление, Па ; P_Γ – газовое противодействие, Па .

Капиллярное давление может быть рассчитано по формуле

$$P_K = \frac{2\sigma \cos \theta}{r}, \quad (7.5)$$

где σ – поверхностное натяжение расплава, Н/м; θ – краевой угол смачивания расплавом материала формы, град.

С учетом закона Пуазейля получено уравнение

$$h = \frac{r}{2B} \sqrt{\frac{1}{\eta} \left(\frac{2\sigma \cos \theta}{r} - P_{\Gamma} \right) \tau}, \quad (7.6)$$

где τ – продолжительность капиллярной пропитки жидкостью пористой среды, с.

Формула (7.6) определяет кинетику капиллярного проникновения жидкости в пористую среду при изотермических условиях. Без учета тепловой стороны процесса уравнение (7.6) не может быть использовано для практических расчетов, поскольку движение расплава в поровом пространстве формы следует рассматривать как гидродинамический процесс, продолжающийся до момента потери струйкой расплава жидкотекучести в результате изменения температурного поля формы.

Продолжительность существования сплава в форме в жидком состоянии можно определить по уравнению [3]

$$\sqrt{\tau} = 0,565 \frac{r\gamma g}{\epsilon_{\Phi}} \ln \frac{t_3 - t_{\Phi}}{t_f - t_{\Phi}}, \quad (7.7)$$

где τ – продолжительность существования расплава в жидком состоянии, с; r – эффективный радиус пор в форме, м; ϵ_{Φ} – удельная теплоемкость расплава, Дж/кг·К; γ – плотность сплава, кг/м³; ϵ_{Φ} – коэффициент теплоаккумулирующей способности формы, Дж/м²·с^{1/2}·К; t_3 – температура заливки металла, К; t_f – температура начала перехода силикатного расплава к вязкожидкому состоянию, К; t_{Φ} – начальная температура формы, К; g – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент теплоаккумулирующей способности формы определяется по формуле

$$\epsilon_{\Phi} = \sqrt{C\lambda\rho}, \quad (7.8)$$

где C – удельная теплоемкость формы, Дж/(кг·К); λ – теплопроводность формы, Вт/(м·К); ρ – плотность формы, кг/м³.

Таким образом, порядок расчета глубины проникновения расплава в поры литейной формы состоит в следующем:

- определение по формуле (7.7) с учетом (7.8) продолжительности τ пребывания сплава в форме в жидком состоянии;

- вычисление максимальной глубины капиллярной пропитки расплавом материала формы по формуле (7.6) с учетом ранее определенного значения τ .

Знание закономерностей продвижения расплава в порах литейной формы позволит выбрать оптимальный зерновой и химический составы формовочных и стержневых смесей, управлять процессами пригарообразования с целью повышения качества и снижения себестоимости производства отливок.

7.2. Варианты контрольного задания

Задание 7.2.1. Расчет глубины проникновения расплава в поры формы

Рассчитать глубину проникновения расплава в поры литейной формы в соответствии с вариантами, приведенными в табл. 7.1, варьируя средний размер зерна (d_H) наполнителя формы (0,4; 0,315; 0,2; 0,16; 0,1) $\times 10^{-3}$ м. Сделать вывод о влиянии размера зерен наполнителя смесей на глубину проникновения расплава в поры литейной формы.

При проведении расчетов принять равными: $t_f = 1478$ К; $\theta = 85^\circ$; $V = 1,6$; $r = d_H/2$.

Для соответствующих сплавов использовать значения параметров C , γ , $t_3 = T_{пл} + 30...50$ К; σ , η , приведенных в приложении 1. Значения теплофизических констант форм C , λ , ρ могут быть определены из приложения 2.

Таблица 7.1

Варианты задания 7.2.1

№ варианта	Тип формовочной смеси	Тип сплава	P_f , Па	t_{ϕ} , К
Пример	Песчано-глинистая сухая	Серый чугун	500	298
7.1	Песчано-глинистая сухая	Серый чугун	450	290
7.2	Песчано-глинистая сырая	Серый чугун	300	295
7.3	Песчано-глинистая сухая	Углеродистая сталь	600	290
7.4	Песчано-глинистая сырая	Углеродистая сталь	550	295
7.5	Песчано-глинистая сырая	Углеродистая сталь	580	298
7.6	Хромомагнетитовая жидкостекольная	Легированная сталь 20X13НЛ	600	290

Продолжение табл. 7.1

№ варианта	Тип формовочной смеси	Тип сплава	P_T , Па	t_{ϕ} , К
7.7	Хромомагнетитовая жидкостекольная	Легированная сталь 20X13НЛ	610	298
7.8	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Серый чугун	350	300
7.9	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Углеродистая сталь	520	303
7.10	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Легированная сталь 20X13НЛ	380	295
7.11	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Углеродистая сталь	290	373
7.12	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Серый чугун	380	403
7.13	Песчано-глинистая сухая	Серый чугун	180	298
7.14	Песчано-глинистая сухая	Углеродистая сталь	150	290
7.15	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Легированная сталь	180	298
7.16	Песчано-глинистая сырая	Серый чугун	210	298
7.17	Хромомагнетитовая жидкостекольная	Серый чугун	270	290
7.18	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Серый чугун	230	295
7.19	Песчано-глинистая сырая	Углеродистая сталь	310	290
7.20	Хромомагнетитовая жидкостекольная	Углеродистая сталь	380	295
7.21	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Углеродистая сталь	430	298
7.22	Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	Легированная сталь 20X13НЛ	460	290
7.23	Песчано-глинистая сухая	Легированная сталь 20X13НЛ	480	298
7.24	Песчано-глинистая сухая	Серый чугун	400	300
7.25	Песчано-глинистая сухая	Углеродистая сталь	280	303
7.26	Песчано-глинистая сухая	Легированная сталь 20X13НЛ	490	295
7.27	Песчано-глинистая сухая	Углеродистая сталь	320	373

№ варианта	Тип формовочной смеси	Тип сплава	$P_{Г}$, Па	$t_{ф}$, К
7.28	Песчано-глинистая сухая	Серый чугун	310	403
7.29	Песчано-глинистая сырая	Углеродистая сталь	220	290
7.30	Песчано-глинистая сухая	Легированная сталь 20Х13НЛ	260	298

Пример выполнения задания 7.2.1 (вариант «Пример»).

Определяется по формуле (7.7) с учетом (7.8) продолжительность пребывания серого чугуна в жидком состоянии в порах формы из песчано-глинистой сухой смеси со средним размером зерен наполнителя $d_H = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м:

$$\sqrt{\tau} = 0,565 \cdot \frac{0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 544 \cdot 7000 \cdot 9,8}{\sqrt{1080 \cdot 1,28 \cdot 1650}} \ln \frac{1573 - 298}{1478 - 298} = 0,216 \text{ с}^{1/2},$$

$$\tau = 0,047 \text{ с.}$$

Максимальная глубина проникновения расплава в поры формы по формуле (7.6):

$$h_{\max} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,6} \sqrt{\frac{1}{0,002} \left(\frac{2 \cdot 1,15 \cdot \cos 85^\circ}{0,2 \cdot 10^{-3}} - 500 \right) 0,047} = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Результаты расчетов проникновения расплава в поры формы приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Результаты расчетов проникновения расплава в поры формы

Тип формовочной смеси	$d_H \cdot 10^3$, м	τ , с	$h_{\max} \cdot 10^3$, м
Песчано-глинистая сухая	0,4	0,047	6,8
	0,315	0,030	5,3
	0,2	0,012	3,0
	0,16	0,008	2,2
	0,1	0,003	1,1

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением размера зерна наполнителя глубина проникновения расплава в поры формы возрастает.

7.3. Лабораторные работы

Работа 7.3.1. Влияние конфигурации отливки, температуры расплава и состава формовочной смеси на образование пригара.

Цель работы. Изучить влияние толщины стенки отливки, свойств заливаемого сплава и формы на качество литой поверхности.

Оборудование, инструмент, материалы: индукционная плавильная печь с рабочей температурой до 1600 °С, плавильный инструмент, литейный чугун марки СЧ20, ступенчатая модель для получения отливки в песчаной форме (рис. 7.1), опоки, формовочный инструмент, формовочные материалы для приготовления песчано-глинистой и песчано-жидкостекольной формовочной смесей, противопопригарная краска состава: графит – 12 %; нитролак – 41 %; растворитель 646 – 18 % или аналогичный, ножовка, шлифовальная шкурка, микроскоп МИМ-8, спецодежда.

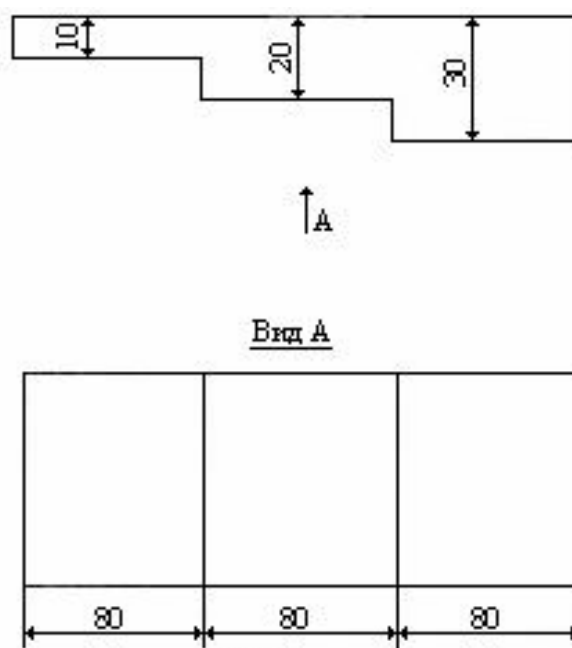


рис. 7.1. Эскиз модели

Порядок выполнения работы.

Работа рассчитана на 4 часа.

1. Изготовить четыре песчано-глинистых и четыре песчано-жидкостекольных литейных форм по ступенчатой модели.
2. На рабочие поверхности одной песчано-глинистой и одной песчано-жидкостекольной формы нанести кистью слой противопопригарной краски.

3. Загрузить шихту для выплавки чугуна марки СЧ20 в плавильную печь, расплавить и довести температуру до 1300 °С.

4. Залить одну песчано-глинистую и одну песчано-жидкостекольную форму (формы без противопригарной краски).

5. Перегреть металл до 1370 °С и залить в соответствии с п. 4 две формы.

6. Перегреть металл до 1450 °С и залить две формы в соответствии с п. 4, и две оставшиеся формы с нанесенной противопригарной краской.

7. После охлаждения выбить отливки, зачистить и отшлифовать боковые поверхности пробы.

8. Оценить толщину пригарной корки на микроскопе МИМ-8.

Обработка опытных данных.

На микроскопе МИМ – 8 оценить толщину пригарной корки, результаты записать в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Экспериментальные результаты

Температура сплава, °С	Толщина стенки отливки, мм					
	Песчано-глинистая форма			Песчано-жидкостекольная форма		
	10	20	30	10	20	30
1300	Формы, окрашенные противопригарной краской					
1370						
1450						
1450						

Для каждого типа форм построить зависимости толщины пригарной корки от температуры заливки и толщины стенки отливки. Сделать выводы. По аналогичной методике можно оценить влияние вышеупомянутых факторов на процессы пригарообразования при получении других сплавов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Болдин, А.Н. Литейные формовочные материалы. Формовочные, стержневые смеси и покрытия / А.Н. Болдин, Н.И. Давыдов, С.С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 2006. – 507 с.
2. Технология литейного производства: учебник / под ред. Б.С. Чуркина. – Екатеринбург: Изд-во УГППУ, 2000. – 662 с.
3. Знаменский, Л.Г. Теория литейных процессов: учебное пособие / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. – 147 с.
4. Теория литейных процессов: учебник для вузов / под ред. Э.Б. Гофмана. – Екатеринбург: Изд-во УГППУ, 2006 г. – 454 с.
5. Васильев, В.А. Физико-химические основы литейного производства: учебник для вузов / В.А. Васильев. – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 400 с.
6. Знаменский, Л.Г. Активация физическими полями литейных процессов: монография / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, В.В. Ерофеев. – Челябинск: Изд-во ЦНТИ, 2009. – 249 с.
7. Электроимпульсная и ультразвуковая обработка материалов в точном литье: монография / Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина, Б.А. Кулаков, В.В. Крымский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 259 с.
8. Производство отливок из цветных сплавов: учебное пособие / Б.А. Кулаков, О.В. Ивочкина, Л.Г. Знаменский. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 118 с.
9. Специальные способы литья: учебник / под ред. Б.С. Чуркина. – Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2010. – 731 с.
10. Кулаков, Б.А. Специальные способы литья. Литье в разовые формы: учебное пособие / Б.А. Кулаков, Л.Г. Знаменский, О.В. Ивочкина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 171 с.
11. Мамина, Л.И. Теоретические основы литейного производства. Кристаллизация сплавов и затвердевание отливок: учебное пособие / Л.И. Мамина. – Красноярск: ГАЦМиЗ, 2002. – 140 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Физические свойства сплавов

Сплав	Температура плавления, $T_{пл}$, К	Поверхностное натяжение, σ , Н/м	Удельная теплоемкость, C , Дж/кг·К	Плотность, γ , кг/м ³	Динамическая вязкость, η , Па·с
1. Алюминиевый	893...1023	0,3 (933)	896	2700	0,0046(973)
2. Серый чугун	1523...1623	1,15 (1573)	544	7000	0,002...0,004 (1473...1673)
3. Углеродистая сталь	1773...1823	1,5 (1793)	501	7200	0,005(1873)
4. Легированная сталь 20Х13НЛ	1823...1873	1,55 (1873)	500	7200	0,0053(1873)
5. Бронза	1323...1373	1,1 (1454)	376	8900	0,0041(1406)
6. Оловянный	483...503	0,526 (505)	230	7290	0,0011(753)

Примечание. В скобках указаны температуры в Кельвинах, для которых приведены значения поверхностного натяжения и динамической вязкости расплавов.

Теплофизические свойства форм

Характеристика формы	Удельная теплоемкость, С, Дж/(кг·К)	Теплопроводность, λ, Вт/(м·К)	Плотность, ρ, кг/м ³
1. Металлическая (чугун)	544	26,32	7000
2. Песчано-глинистая сухая	1080	1,28	1650
3. Песчано-глинистая с 20 % асбестовой крошки	1060	0,54	1550
4. Хромомагнетитовая жид- костекольная	1980	2,56	2700
5. Песчано-глинистая сырая	2100	1,33	1650

Ориентировочные значения теплофизических констант металлов и критериев K_L и K_B

192

Константы и критерии	Свинец	Алюминий	Медь	Чугун	Никель	Сталь	Титан
L , ккал/кг	6,3	93	49	80*	74	75*	90
C , ккал/(кг·град)	0,03	0,26	0,13	0,18	0,15	0,20	0,18
t_3 , °C	327	660	1063	1130	1520	1520	1670
K_L	0,68	0,57	0,32	0,40	0,35	0,25	0,31
λ , ккал/(м·ч·град)	14	190	280	20	58	20	11
γ , кг/м ³ **	10300	2600	8300	7000	8450	7200	4100
a , м ² /ч	0,06	0,30	0,26	0,014	0,045	0,014	0,015
ϵ_M , ккал/(м ² ·град·ч)	65	350	550	170	270	170	90
ϵ_Φ , ккал/(м ² ·град·ч) ***	12	15	18	18	21	22	—
K_B (песчаная форма)	0,18	0,043	0,033	0,10	0,08	0,13	—
K_B (чугунная форма)	0,38	0,50	0,30	1,00	0,63	1,00	—
K_K (при $K_B \rightarrow \infty$)	1,50	1,60	1,80	1,70	—	1,90	—

* Указаны значения полной теплоты затвердевания, включающей в себя скрытую теплоту и теплоту интервала кристаллизации.

** Значения γ относятся к твердо-жидкому состоянию сплавов и к температурам, близким к t_3 для чистых металлов.

*** Приведены разные значения ϵ_Φ для песчаной формы в зависимости от температуры затвердевания заливаемого металла

Интеграл Гаусса*

z	erfz	z	erfz	z	erfz	z	erfz
0,00	0,000	0,30	0,329	0,60	0,604	0,90	0,797
0,01	0,011	0,31	0,339	0,61	0,612	0,91	0,802
0,02	0,022	0,32	0,349	0,62	0,619	0,92	0,807
0,03	0,033	0,33	0,359	0,63	0,627	0,93	0,812
0,04	0,045	0,34	0,369	0,64	0,635	0,94	0,816
0,05	0,056	0,35	0,379	0,65	0,642	0,95	0,821
0,06	0,068	0,36	0,389	0,66	0,643	0,96	0,825
0,07	0,079	0,37	0,399	0,67	0,657	0,97	0,834
0,08	0,090	0,38	0,409	0,68	0,664	0,98	0,834
0,09	0,101	0,39	0,419	0,69	0,670	0,99	0,839
0,10	0,12	0,40	0,428	0,70	0,673	1,00	0,843
0,11	0,124	0,41	0,438	0,71	0,685	1,05	0,862
0,12	0,135	0,42	0,447	0,72	0,691	1,10	0,830
0,13	0,145	0,43	0,457	0,73	0,698	1,15	0,896
0,14	0,157	0,44	0,466	0,74	0,705	1,20	0,910
0,15	0,168	0,45	0,475	0,75	0,711	1,25	0,923
0,16	0,179	0,46	0,485	0,76	0,718	1,30	0,934
0,17	0,190	0,47	0,494	0,77	0,724	1,35	0,944
0,18	0,201	0,48	0,503	0,78	0,730	1,40	0,953
0,19	0,212	0,49	0,512	0,79	0,736	1,45	0,960
0,20	0,223	0,50	0,520	0,80	0,742	1,50	0,966
0,21	0,234	0,51	0,529	0,81	0,748	1,55	0,971
0,22	0,244	0,52	0,538	0,82	0,754	1,60	0,976
0,23	0,255	0,53	0,446	0,83	0,760	1,65	0,980
0,24	0,266	0,54	0,555	0,84	0,765	1,70	0,980
0,25	0,276	0,55	0,563	0,85	0,771	1,80	0,989
0,26	0,287	0,56	0,572	0,86	0,776	1,90	0,993
0,27	0,297	0,57	0,580	0,87	0,781	2,00	0,995
0,28	0,308	0,58	0,588	0,88	0,787	2,50	0,999
0,29	0,318	0,59	0,596	0,89	0,792	Более 2,5	1,000

*Называется также «интегралом ошибок» и обозначается erfz.

Температурные коэффициенты расширения и сжатия чистых металлов

Металл	ТКЛР, $1/K \cdot 10^6$ при $t, ^\circ C$									ТКЛС $1/K \cdot 10^6$	В интервале температур охлаждения
	100	200	300	400	500	600	800	900	1000		
Al	23,9	24,3	25,3	26,49	–	–	–	–	–	41	$t_C \dots 520$
Au	14,2	–	–	–	15,2	–	–	16,7	–	–	–
Zn	31,0	33,0	34,0	–	–	–	–	–	–	33	$t_C \dots 180$
Cu	17,1	17,2	–	–	18,3	–	–	–	20,3	17,5	$t_C \dots 880$
Mg	26,1	27,0	–	28,9	–	–	–	–	–	–	–
Sn	23,8	24,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Fe	12,2	12,9	–	13,8	–	14,5	14,6	–	–	18...24 11...13	$t_C \dots 900$ $912 \dots 25$
Cd	31,8	–	38	–	–	–	–	–	–	–	–
Sb	8,4... ...11,0	–	–	–	9,7... ...11,6	–	–	–	–	–	–
Ge	6,6	–	–	8,4	–	–	–	–	–	–	–
Bi	13,4	–	–	–	–	–	–	–	–	16,6	$t_C \dots 120$
Ti	8,8	9,1	–	9,4	–	9,7	9,9	–	–	–	–

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ	
1.1. Общие сведения.....	4
1.2. Варианты контрольных заданий.....	19
1.3. Лабораторные работы.....	23
2. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ	
2.1. Общие сведения.....	27
2.2. Варианты контрольных заданий.....	37
2.3. Лабораторные работы.....	47
3. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ ФОРМ РАСПЛАВОМ	
3.1. Общие сведения.....	52
3.2. Варианты контрольных заданий.....	68
3.3. Лабораторные работы.....	75
4. ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ КОНТАКТЕ РАСПЛАВА С ФОРМОЙ	
4.1. Общие сведения.....	84
4.2. Варианты контрольных заданий.....	92
4.3. Лабораторные работы.....	99
5. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ, УСАДКА И НАПРЯЖЕНИЯ В ОТЛИВКАХ	
5.1. Общие сведения.....	103
5.2. Варианты контрольных заданий.....	146
5.3. Лабораторные работы.....	156
6. ГАЗОВЫЙ РЕЖИМ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ	
6.1. Общие сведения.....	174
6.2. Варианты контрольных заданий.....	176
6.3. Лабораторные работы.....	180
7. ПРИГАРООБРАЗОВАНИЕ НА ОТЛИВКАХ	
7.1. Общие сведения.....	181
7.2. Варианты контрольных заданий.....	184
7.3. Лабораторные работы.....	187
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	189
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	190

Знаменский Леонид Геннадьевич
Ивочкина Ольга Викторовна
Ердаков Иван Николаевич
Варламов Алексей Сергеевич

ТЕОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВКИ

Учебное пособие

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 17.02.2017. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 11,39. Тираж 30 экз. Заказ 807/148.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.