

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

В. А. Скворцов
Ю. А. Николайчик

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗОВЫХ ФОРМ

Учебно-методическое пособие к практическим занятиям
для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины
и технология литейного производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
по образованию в области металлургического
оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2019

УДК 621.746.4(076.5)(075.8)

ББК 34.615я7

С42

Р е ц е н з е н т ы:

канд. техн. наук, зав. кафедрой «Детали машин» Белорусского государственного технологического университета *С. Е. Бельский*;

канд. техн. наук, декан механико-технологического факультета Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого *И. Б. Одарченко*

Скворцов, В. А.

С42 Проектирование и расчет литниковых систем для разовых форм : учебно-методическое пособие к практическим занятиям для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства» / В. А. Скворцов, Ю. А. Николайчик. – Минск: БНТУ, 2019. – 109 с.

ISBN 978-985-550-842-8.

Учебно-методическое пособие разработано в соответствии с типовой программой по курсу «Основы литейной гидравлики и гидродинамики», содержит подробное описание различных конструкций литниковых систем, их назначение и расчет для разовых литейных форм. Учебно-методическое пособие предназначено для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства».

УДК 621.746.4(076.5)(075.8)

ББК 34.615я7

ISBN 978-985-550-842-8

© Скворцов В. А.,
Николайчик Ю. А., 2019
© Белорусский национальный
технический университет, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ	5
1.1. Конструкции литниковых систем	5
1.2. Требования к литниковым системам	23
2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТИПОВЫХ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ	25
2.1. Пример расчета типовой литниковой системы	35
3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДРОССЕЛЬНОЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ	46
3.1. Пример расчета дроссельной литниковой системы	58
4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ РАЗЪЕМА	61
4.1. Пример расчета вертикальной литниковой системы	70
4.2. Моделирование литейных процессов	76
5. РАСЧЕТ ГРУЗА	88
6. ВЫБОР ТИПА И КОНСТРУКЦИИ ПРИБЫЛЕЙ	89
7. ВЫБОР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ХОЛОДИЛЬНИКОВ	105
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	109

ВВЕДЕНИЕ

Литейное производство – один из старейших и до настоящего времени основных способов получения металлических изделий и заготовок для различных отраслей промышленности. В мировом литейном производстве более 80 % отливок изготавливают в разовых формах из различных смесей на базе основного наполнителя – кварцевого формовочного песка. Широкое применение технологий формообразования и изготовления разовых форм и стержней обусловлено относительной дешевизной и доступностью исходных компонентов, возможностью обеспечивать технологически необходимые свойства смесей при многократном использовании материалов, изготавливать широкую номенклатуру отливок как в единичном, так и в массовом производстве. Перечисленные преимущества разовых форм позволяют создавать большое разнообразие технологий изготовления отливок как из черных, так и цветных сплавов. Анализ существующих технологических процессов показывает, что одним из основных условий получения качественных бездефектных отливок является правильный выбор конструкции и размеров литниковой системы.

Цель данного учебно-методического пособия – дать будущему инженеру теоретические и практические знания по конструированию литниковых систем для различных технологических процессов и правильному их расчету.

В учебно-методическом пособии подробно описаны существующие конструкции литниковых систем, даны рекомендации по их применению и методики расчета. Одновременно проводится анализ целесообразности применения выбранной литниковой системы для данного технологического процесса путем ее моделирования, что позволяет значительно сокращать цикл разработки технологического процесса. Описаны способы устранения дефектов усадочного характера путем применения прибылей, питающих бобышек и выпоров, а также использованием холодильников. Представлена методика их выбора и расчета.

1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

1.1. Конструкции литниковых систем

Литниковой системой называют совокупность элементов литейной формы в виде каналов и полостей, предназначенных для ламинарного подвода расплава в форму, ее полного заполнения и питания отливки в процессе затвердевания.

Типовая литниковая система (рис. 1.1) состоит из следующих основных элементов.

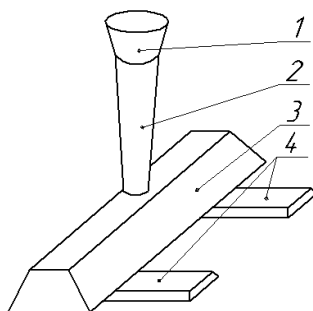


Рис. 1.1. Конструкция типовой литниковой системы:
1 – литниковая воронка (чаша); 2 – стояк;
3 – шлакоуловитель; 4 – питатель

1. *Литниковая воронка или чаша*, предназначенная для приема из ковша дозы расплавленного металла, дальнейшей подачи его в стояк и первичного задерживания шлака, попавшего вместе с расплавом из заливочного ковша. Литниковые воронки применяются при изготовлении мелких и средних отливок, когда расход металла в литниковой системе не превышает 5 кг/с. При больших расходах используют литниковые чаши, которые изготавливаются либо в верхней опоке литейной формы (рис. 1.2), либо отдельно от нее, в виде так называемых чаш-наращалок (рис. 1.3). В литниковых чашах изготавливается специальный выступ, с помощью которого осуществляется «завихрение» падающей из ковша струи расплава, что способствует всплыванию шлака и удерживанию его в верхних слоях находящегося в чаше жидкого металла. Кроме того, этот

выступ в сочетании с двумя вертикальными ребрами препятствует образованию «воронок» в стояке и «втягиванию» верхних слоев расплава из чаши в стояк.

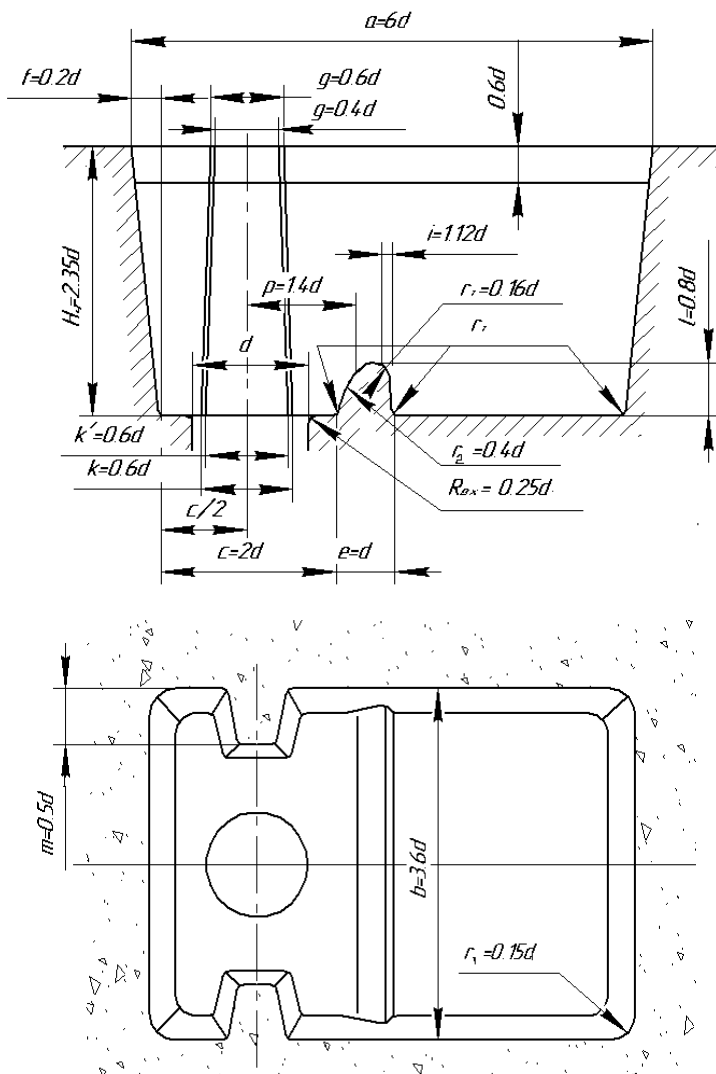


Рис. 1.2. Эскиз формованной литниковой чаши с порогом, обеспечивающей расход металла до 10 кг/с

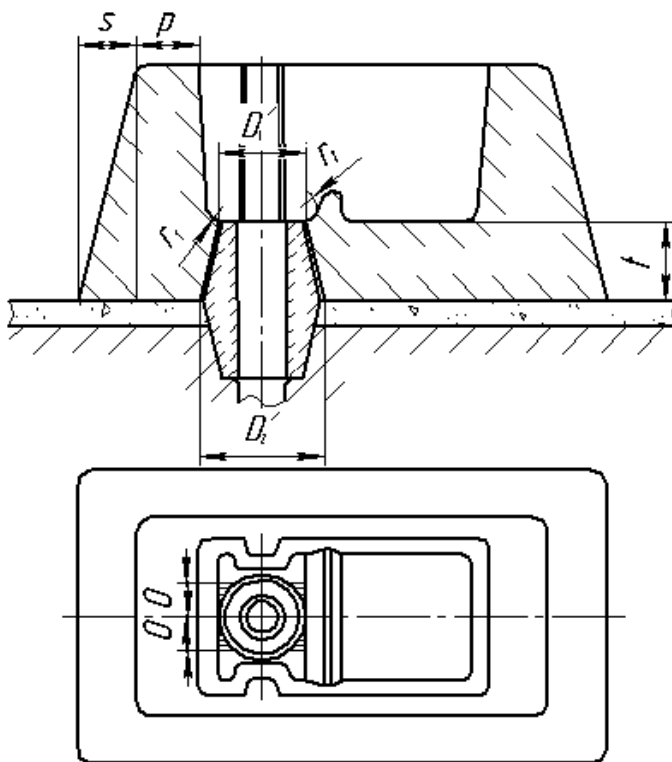


Рис. 1.3. Эскиз литниковой чаши-нарощалки с расходом металла до 10 кг/с

Крупные чаши-нарощалки (расход от 10 до 50 кг/с) выполняют с перегородкой, которая разделяет чашу на две равные секции – приемную и расходную (рис. 1.4). Расплав заливается в приемную секцию чаши и его нижние слои (без шлака) под перегородкой, поступает в расходную секцию и далее в стояк (рис. 1.4).

Для более эффективного удерживания шлака в чаше-нарощалке и предотвращения размыва расплавом стояка применяют специальные керамические пробки, которые устанавливаются у основания чаши и перекрывают поступление расплава в стояк. При полном заполнении чаши металлом пробка вынимается (или всплывает) и расплав поступает в стояк.

Чаши-нарощалки изготавливаются из стержневой смеси, как правило, жидкостекольной или ХТС в стержневых ящиках и, если

это необходимо, армируются по всему верхнему периметру для предотвращения разрушения чаши во время заливки.

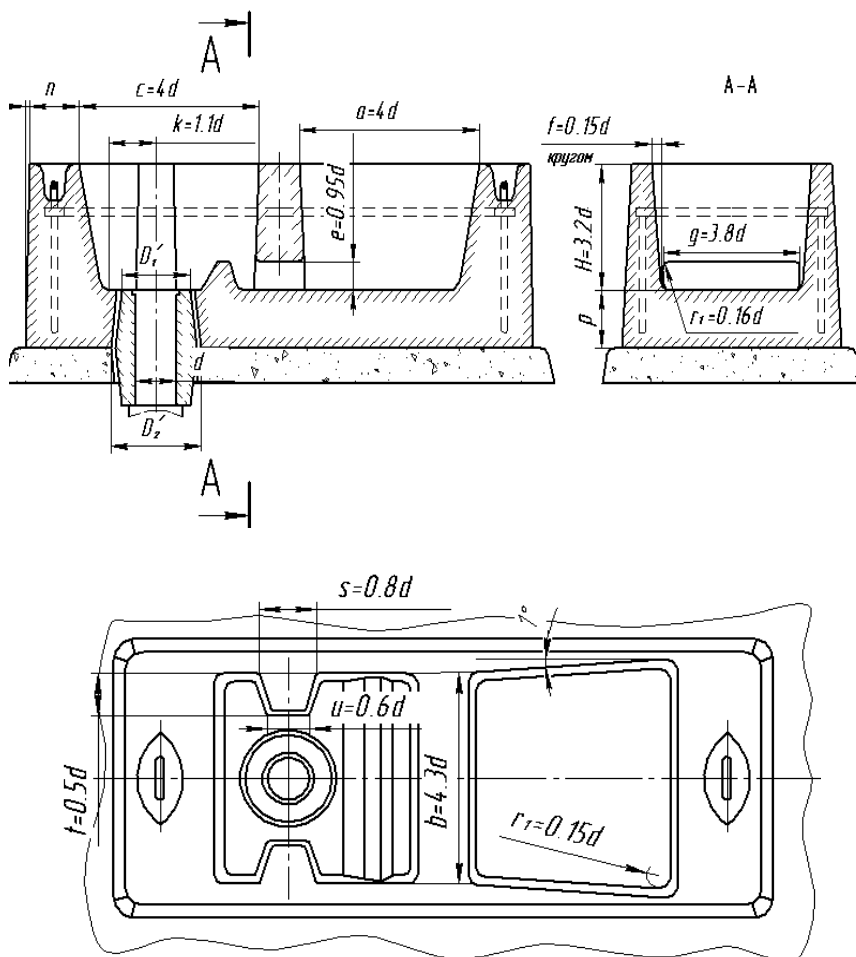


Рис. 1.4. Эскиз литниковой чаши-нарошалки с перегородкой, обеспечивающей расход металла до 50 кг/с

Соединение чаши-нарошалки со стояком осуществляется с помощью стержня-стакана (или керамического стакана), который позволяет предотвратить уход металла в месте соединения.

Номера литниковых воронок, формуемых чаш с порогом и чаш-нарощалок определяют по номограммам (рис. 1.5 а, б, в), а их размеры для чугунных отливок определяют по табл. 1.1, 1.2, 1.3 и 1.4.

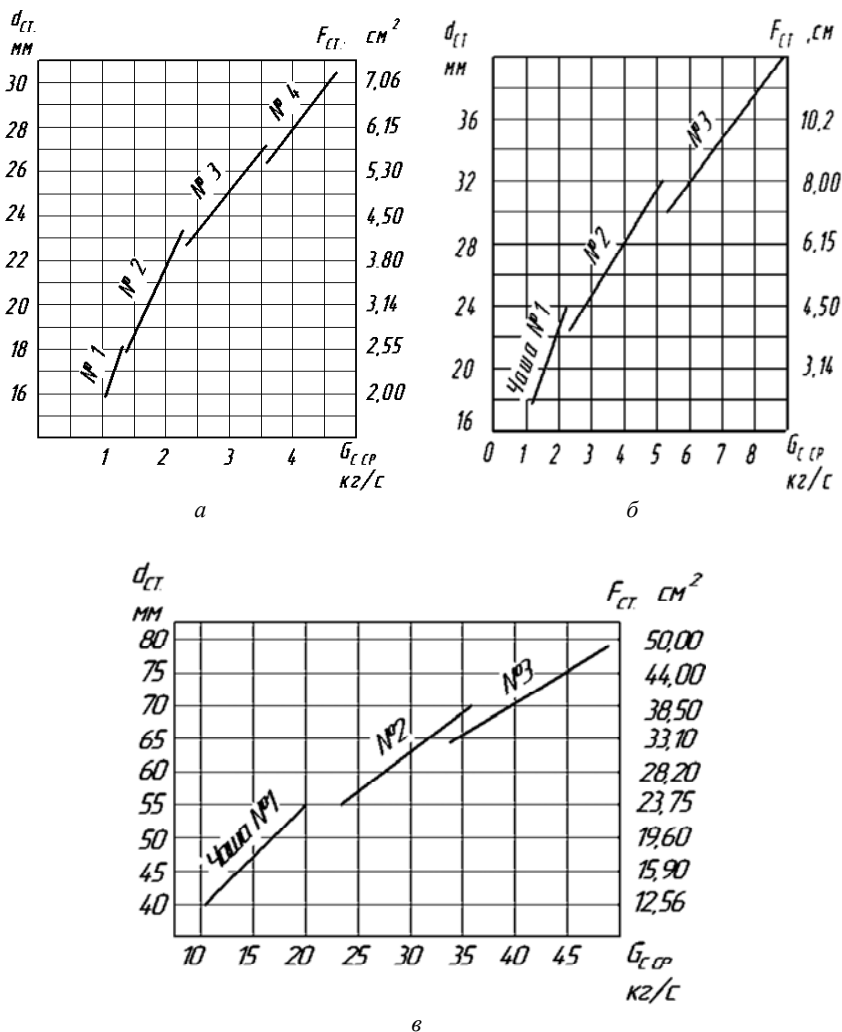


Рис. 1.5. Номограммы для определения номера и $d_{ст. в}$ литниковых воронок, формуемых чаш и чаш-нарощалок: а – для литниковых воронок; б – для формуемых чаш; в – для чаш-нарощалок

Таблица 1.1

Размеры литниковых воронок

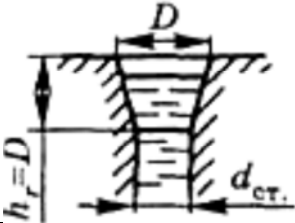
$D = (2,7-3)h_{ст. в.}$	№ воронки	$G_{с. нач.}$	$D = h_r$	$d_{ст. в.}$
	1	до 1,5	50	18
	2	1,5-2,5	60	23
	3	2,5-3,5	75	27
	4	3,5-5,0	90	30

Таблица 1.2

Размеры формованных литниковых чаш, обеспечивающих расход металла до 10 кг/с

Размер	№ 1	№ 2	№ 3	Размер	№ 1	№ 2	№ 3
	$d_{ст.в.}, мм$				$d_{ст.в.}, мм$		
	24	32	40		24	32	40
	Масса металла в чаше, кг				Масса металла в чаше, кг		
	4,5	15,0	21,5		4,5	15,0	21,5
a	144	192	240	$H'_ч$	80	105	130
b	84	112	140	i	3	4	5
c	48	65	80	p	34	45	56
e	24	32	40	k	20	26	32
f	5	6	8	k'	15	19	24
g	15	19	24	l	19	26	32
g'	10	13	16	m	12	16	20
				R_{bx}	6	8	10

Таблица 1.3

Размеры литниковых чаш-нарощалок
с расходом металла до 10 кг/с

Номер чаши	Номер стакана	Размер, мм						
		D_1	D_2	o	p	s	t	r_1
1	1	46	56	13	30	10	30	4
2	2	65	77	20	35	12	45	5
3	2	65	77	–	35	15	45	6

Таблица 1.4

Размеры литниковых чаш-нарощалок с перегородкой,
обеспечивающих расход металла до 50 кг/с

Размер	№ 1	№ 2	№ 3	Размер	№ 1	№ 2	№ 3
	$d_{\text{ст.в.}}, \text{мм}$				$d_{\text{ст.в.}}, \text{мм}$		
	50	65	75		50	65	75
	Масса металла в чаше, кг				Масса металла в чаше, кг		
	68	156	231		68	156	231
a	200	260	300	k	55	72	83
b	215	280	320	l	55	75	83
c	200	260	300	m	32	42	48
D_1	97	118	133	n	45	75	90
D_2	100	135	150	o	30	60	60
e	48	62	70	p	50	70	70
f	8	10	12	s	40	52	60
g	190	246	285	t	25	32	38
H'_4	160	210	240	u	30	40	45
i	75	97	112	v	15	20	22

2. *Стояк* – вертикальный или наклонный канал, служащий для передачи расплавленного металла из литниковой воронки или чаши к другим элементам литниковой системы или непосредственно в полость литейной формы.

Наиболее часто применяются вертикальные конические стояки (рис. 1.1, 2). Как правило, стояки в виде обратного конуса, сужающиеся книзу, используются при ручной формовке, а при машинной сужающиеся кверху, так как они крепятся к подмодельной плите, а воронка – фрезеруется.

3. *Шлакоуловитель* предназначен для окончательного задержания неметаллических включений (шлак, частицы формовочной смеси и др.) и передачи расплава из стояка к питателям (рис. 1.1, 3).

На практике чаще всего применяют шлакоуловители трапециевидальной формы постоянного или переменного поперечного сечения по длине канала. Размеры шлакоуловителя должны быть такими, чтобы при ламинарном движении по нему расплава частицы шлака или другие неметаллические включения всплывали бы в его верхнюю часть за счет разницы в плотности между ними и расплавом. Учитывая это, питатели должны располагаться в нижней части шлакоуловителя. Только такое их расположение будет обеспечивать поступление в полость литниковой формы чистого расплава, освобожденного от шлака.

Повысить эффективность улавливания шлака в литниковой системе можно путем установки специальных бобышек и уступов, обеспечивающих принудительное заполнение шлакоуловителя, при котором расплав не может подаваться к питателям, не заполнив предварительно поперечное сечение шлакоуловителя (рис. 1.6).

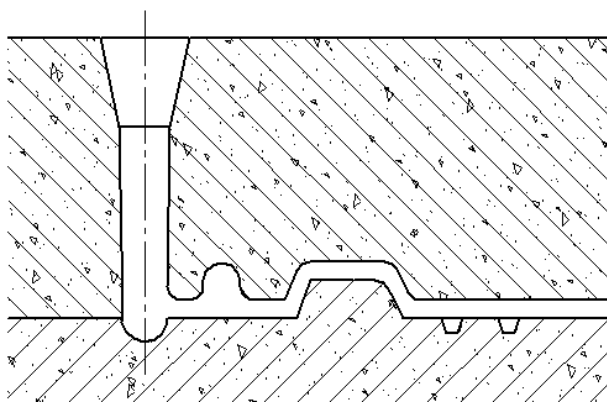


Рис. 1.6. Схема литниковой системы с принудительным заполнением шлакоуловителя

Эффективным способом улавливания шлака, особенно при изготовлении крупных отливок (массой более 1 т), является применение центробежных шлакоуловителей, в которых расплав подается по касательной в периферийную часть круглой бобышки (рис. 1.7). Центробежные силы выталкивают менее плотные неметаллические включения в центральную часть бобышки, а чистый жидкий металл по отводному каналу подается к питателям. При проектировании центробежных шлакоуловителей следует учитывать, что площадь сечения отводного канала меньше, чем подводного.

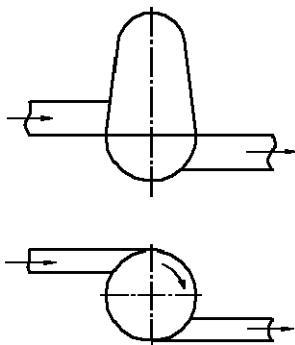


Рис. 1.7. Схема центробежного шлакоуловителя

Центробежный шлакоуловитель является обязательным элементом литниковой системы при модифицировании высокопрочного чугуна магниевой лигатурой в литейной форме и располагается сразу после реакционной камеры для улавливания нерастворившихся частиц модификатора и продуктов его взаимодействия.

4. *Питатели* – каналы, обеспечивающие подвод расплавленного металла непосредственно в полость литейной формы. Чаще всего питатели выполняют с трапециевидальным поперечным сечением и располагают их в нижней полуформе под шлакоуловителем (рис. 1.1, 4). Если это невозможно, тогда питатель размещают в верхней полуформе. В этом случае для исключения попадания шлака в отливку отношение высоты шлакоуловителя к высоте питателя не должно быть меньше 5. Сечение питателя по его длине, как правило, делают одинаковым. Для того чтобы питатели отделялись как можно ближе к телу отливки (для чугунных отливок), можно

увеличить сечение питателя на 5–10 % по сравнению с расчетным, а затем довести его до расчетного путем уменьшения высоты в месте подвода к отливке, то есть сделать его конусным. Высота питателя в месте подвода его к отливке должна быть на 3–5 мм меньше толщины стенки отливки, чтобы избежать поломки отливки при обламывании литниковой системы.

Питатели к шлакоуловителю подводят под прямым углом, а иногда – под тупым. Это делается для того, чтобы первая порция расплава, которая содержит наибольшее количество неметаллических включений, не могла бы попасть в полость литейной формы.

В зависимости от способа заполнения формы металлом литниковые системы можно разделить на сифонные (рис. 1.8), горизонтальные (рис. 1.9), дождевые (рис. 1.10), ярусные и комбинированные (рис. 1.11) и вертикальные для случаев формовки с вертикальной плоскостью разъема, например АФЛ «Disamatic» (рис. 1.12).

Сифонные литниковые системы (рис. 1.8) служат для заполнения металлом полости формы снизу и обеспечивают наиболее спокойное заполнение формы. Применяются в тех случаях, когда подвод металла сверху невозможен или нежелателен из-за разбрызгивания расплава при падении на стержни или выступающие части формы. При использовании сифонной литниковой системы нижняя часть формы оказывается заполненной более горячим по сравнению с верхней частью металлом.

Располагая сверху (по положению при заливке) толстые части некоторых чугуновых деталей, можно при сифонной заливке получить плотные детали без применения прибылей. Если все-таки прибыль потребуется, то для создания условий направленного затвердевания отливки должна быть предусмотрена подача расплава в прибыль либо через отдельную литниковую систему, либо непосредственно из ковша после заполнения собственно литейной полости. Такие комбинированные литниковые системы будут более подробно рассмотрены ниже.

Сифонная заливка способствует образованию на зеркале металла оксидной пленки, препятствующей удалению из расплава газовых пузырьков, что может приводить к образованию в теле отливки газовых дефектов. Особенно часто этот недостаток сифонной заливки проявляется при изготовлении высоких тонкостенных отливок. На рис. 1.8 представлены примеры сифонных литниковых систем.

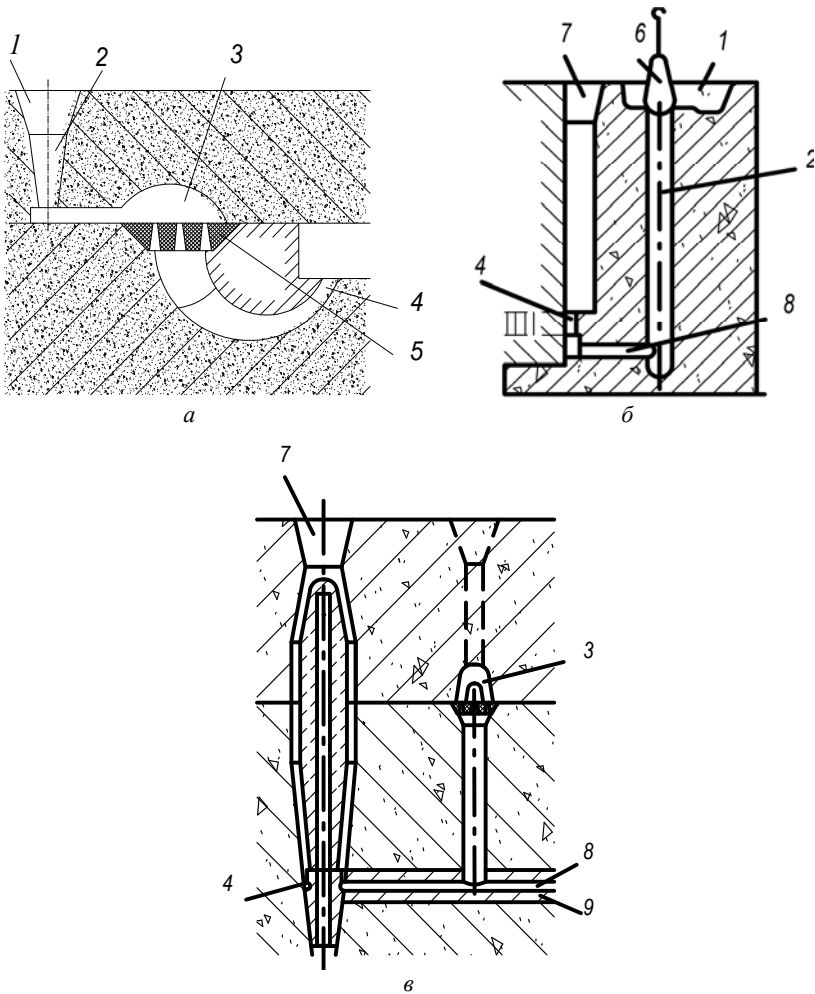


Рис. 1.8. Сифонные литниковые системы:

- 1 – воронка или чаша; 2 – стояк; 3 – шлакоуловитель; 4 – питатель; 5 – сетка;
 б – пробка; 7 – прибыль; 8 – литниковый ход; 9 – стержень

На рис. 1.8, а, рожковая литниковая система, в которой малым сечением служит узкий конец рожкового питателя 4. Применяется при ручной формовке мелких отливок, когда подвод металла по разъему формы недопустим (например, шестерни с литым зубом), или в целях особо спокойного заполнения формы.

На рис. 1.8, *б*, сифонная литниковая система, малым сечением которой является литниковый ход δ . Применяется при ручной формовке средних и крупных толстостенных отливок, особенно с цилиндрической геометрией.

На рис. 1.8, *в*, сифонная литниковая система, малым сечением которой является литниковый ход δ . Применяется при ручной и машинной формовке средних отливок.

Горизонтальные литниковые системы располагаются в плоскости разъема литейной формы и поэтому оказываются наиболее удобными при формовке. На рис. 1.9 представлены примеры литниковых систем, состоящих из подводящих питающих элементов. На рис. 1.9, *а*, показана подводящая упрощенная горизонтальная литниковая система, состоящая из чаши 1, стойка 2 и питателя 3. Малым сечением служит питатель. Применяется при отсутствии в опоке места для установки шлакоуловителя.

В подводящей простой литниковой системе (рис. 1.9, *б*) малым сечением служат питатели 4, ввиду этого при заданном массовом расходе линейная скорость металла в месте входа в полость формы относительно велика. Применяется для простых, неответственных отливок.

На рис. 1.9, *в* и *г*, показаны подводящие системы с фильтровальной сеткой по разъему и в воронке. Ввиду того, что сетка представляет собой гидравлическое сопротивление, при заданном весовом расходе линейная скорость металла при входе в полость формы меньше, чем в простой системе (рис. 1.9, *б*). Система с сеткой в воронке неудобна при заливке вследствие выплескивания металла, поэтому она находит применение только при недостатке свободной площади на подмодельной плите или необходимости медленной заливки формы. Применяется для ответственных, обрабатываемых отливок, когда металл поступает в литейную полость через боковую прирубь; при большом количестве мелких отливок в форме, когда общая площадь сечения питателей велика.

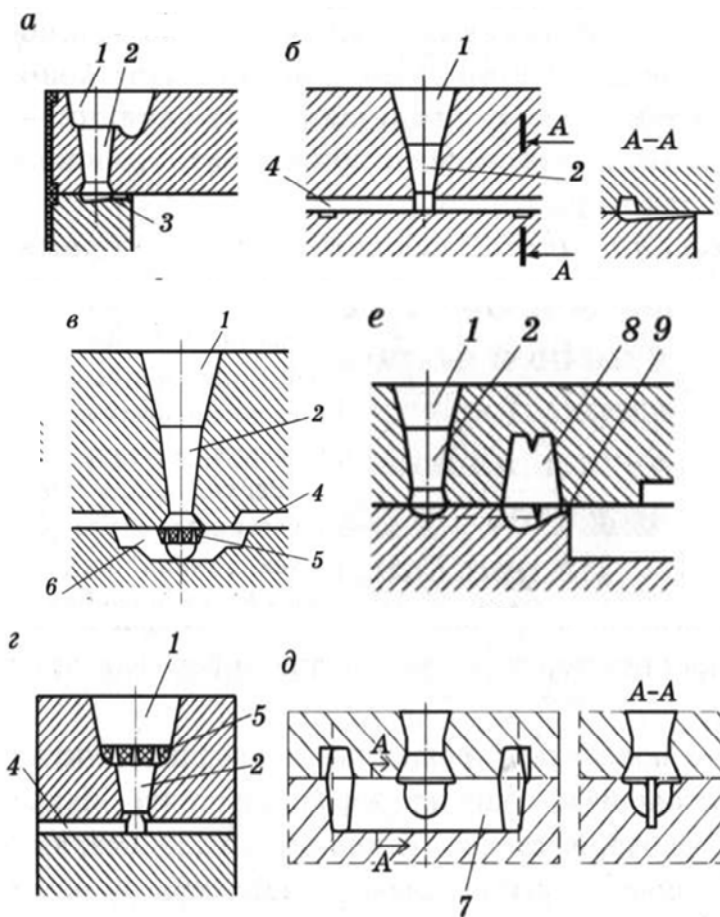


Рис. 1.9. Горизонтальные литниковые системы:

1 – воронка или чаша; 2 – стояк; 3 – питатель; 4 – шлакоуловитель; 5 – фильтровальная сетка; 6 – металлоприемник сетки; 7 – горизонтальный дроссель; 8 – центробежный шлакоуловитель; 9 – шейка; 10 – литниковый ход

На рис. 1.9, д, е, представлены схемы подводящих систем с дросселями. Под дросселем понимается местное гидравлическое сопротивление литниковой системы. Здесь дроссель имеет вид щели и выполняет функции сетки. Система со щелевым дросселем обладает всеми преимуществами систем, представленных на рис. 1.9, в, г. К дополнительным преимуществам относится отсутствие стержне-

вых сеток. Так как дроссель формируется в сырой форме, возможно более гибкое регулирование продолжительности заполнения форм путем изменения сечения дросселя. Применяются в тех же случаях, что и системы с сеткой.

Верхние и дождевые литниковые системы (рис. 1.10, *а–и*) применяются для отливок с вертикальными стенками при условии, когда свободное падение металла является в то же время движением «по телу». Основная особенность верхних и дождевых литниковых систем состоит в том, что они создают «горячее» зеркало металла в литейной полости и способствуют кристаллизации отливки снизу вверх. Достаточно медленная заливка позволяет получать простые вертикальные отливки плотными без прибылей. В противоположность этому относительно быстрое заполнение формы вызывает необходимость последующего питания отливки из прибыли. Питатели следует располагать ближе к той стороне, которая должна быть чистой после механической обработки. Системы, представленные на рис. 1.10, *а, б, в, ж, з, и*, состоят из подводящих элементов, а на рис. 1.10, *з, д, е*, – из подводящих и питающих.

На рис. 1.10, *а, б, в*, показаны подводящие упрощенные литниковые системы, состоящие из чаши или воронки 1 и стояка 2. Малым сечением служит основание стояка. Такие системы применяются, когда для сокращения пути металла и равномерного заполнения формы требуется подача металла в центр отливки, например для заливки шкивов, маховиков, шестерен (рис. 1.10, *а*), а также для подачи горячего металла в верхнюю часть формы для заливки тракторных крышек блока (рис. 1.10, *б*) и тонкостенных отливок: сковородок, горшков, котлов и т. п. (рис. 1.10, *в*). Система, приведенная на рис. 1.10, *б*, благодаря подводу металла в бобышки отливки вначале работает как сифонная, а в конце – как дождевая. На рис. 1.10, *з*, в подводяще-питающей системе с сеткой малым сечением служит основание стояка. Применяется в случаях, аналогичных с системой, показанной на рис. 1.10, *а*, но только для мелких отливок. Система обеспечивает питание ступицы при затвердевании.

В подводяще-питающей системе с сеткой (рис. 1.10, *д*) малым сечением служит сетка. В процессе заливки чаша и сетка служат подводящими элементами. По окончании заливки сетка всплывает, благодаря чему образуется сплошная прибыль. Плавающая сверху сетка, уменьшая радиацию и конвекцию, «утепляет» прибыль.

В подводяще-питающей системе с чашей и отбиваемой прибылью 9 (рис. 1.10, е) малым сечением служит отверстие в чаше 1 или отверстие в сетке 5. Применяется для средних и тяжелых отливок.

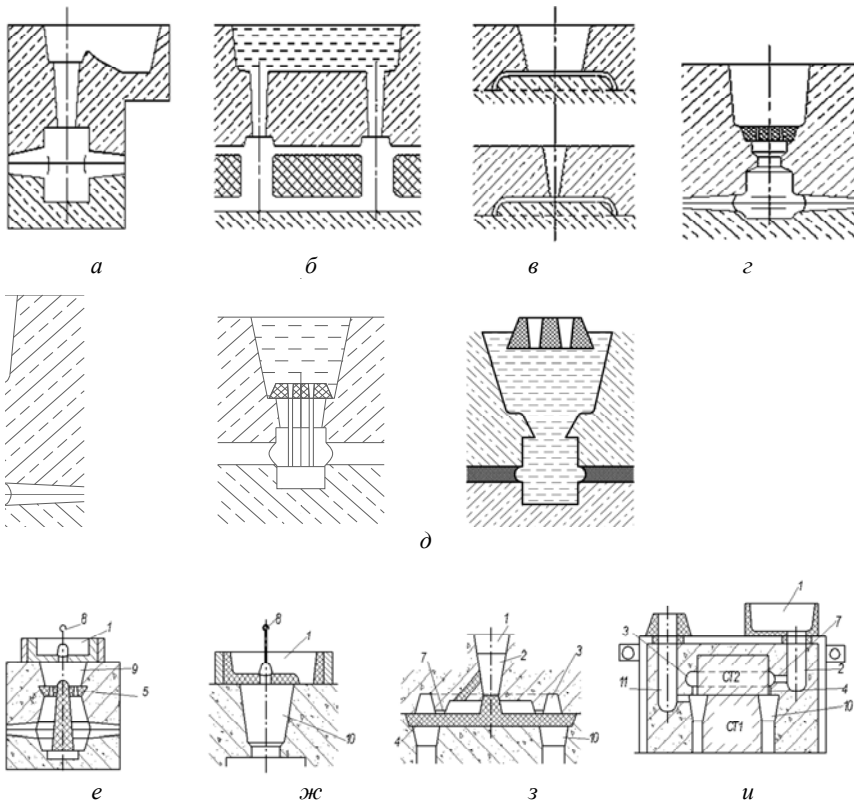


Рис. 1.10. Дождевые литниковые системы

В системе для подачи металла в отрезаемую прибыль 10 (рис. 1.10, ж) малым сечением служит отверстие в чаше 1. Применяется для средних и тяжелых отливок.

В подводящей литниковой системе для втулок, цилиндров при горизонтальном разъеме формы (рис. 1.10, з) малым сечением служит дроссель в основании стояка или отверстия в сетке. Применяется для полых отливок цилиндрической формы.

В подводящей литниковой системе для втулок цилиндров при вертикальном разьеме формы (рис. 1.10, *и*) малым сечением служит дроссель 7 в основании стояка или суммарная площадь дождевых питателей 3. Литниковая система применяется для средних и тяжелых отливок цилиндрической формы.

Ярусные (этажные) литниковые системы служат для подачи металла в разные горизонты литейной формы (рис. 1.11, *а, б*). Применяются для заливки сточных форм, а также для заполнения одной формы снизу вначале заливки и подачи горячего металла в верхние части литейной полости по мере подъема уровня. В известной мере они сочетают преимущества дождевой и сифонной литниковых систем.

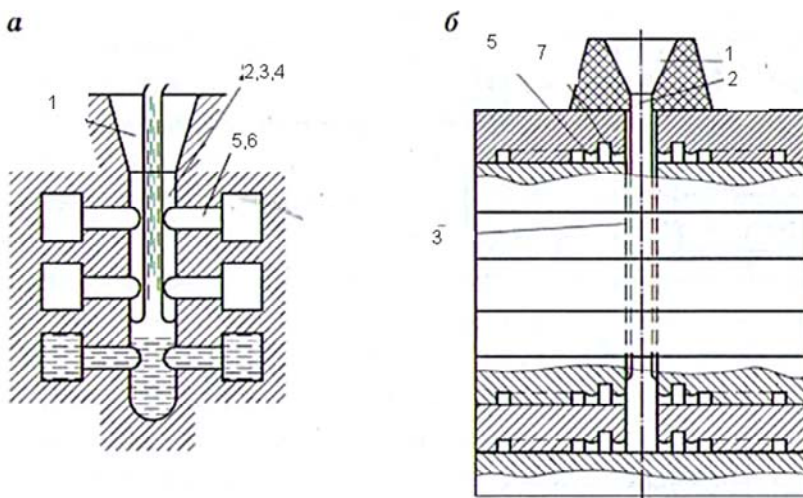


Рис. 1.11 Ярусные (этажные) литниковые системы:

- 1 – воронка или чаша; 2 – основной стояк; 3 – распределительный стояк;
4 – прибыль; 5 – питатель; 6 – шейка; 7 – дроссель

Вертикальные литниковые системы применяются при вертикальной плоскости разьема формы. Существуют четыре вида принципиально различных вертикальных литниковых систем (рис. 1.12):

- напорные литниковые системы (рис. 1.12, *а*);
- безнапорные литниковые системы (рис. 1.12, *б*);
- литниковые системы, работающие при нормальном давлении (рис. 1.12, *в*);
- смешанные (гибридные) литниковые системы (рис. 1.12, *г*).

Напорная литниковая система характеризуется размерами впускных литников, которые рассчитываются по формуле для свободного падения с учетом трения.

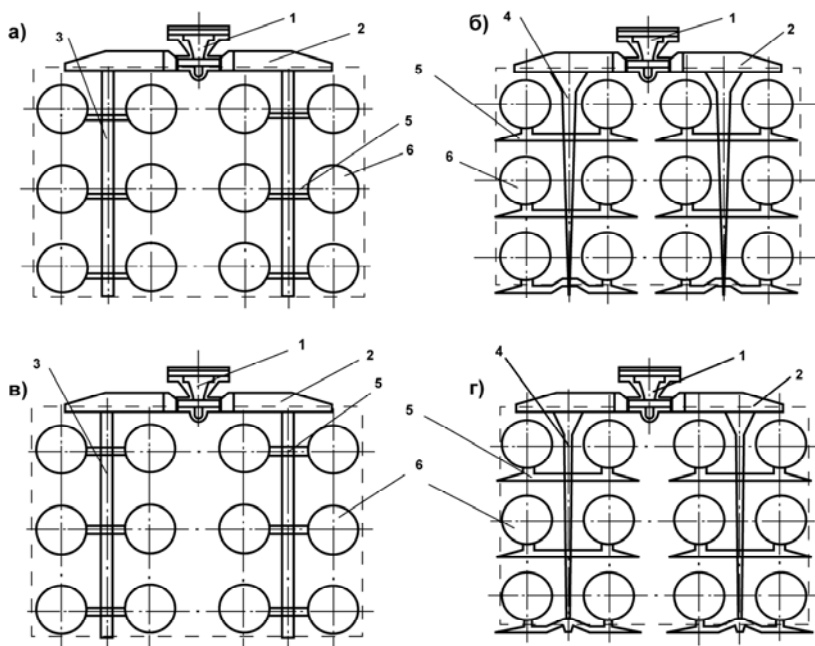


Рис. 1.12. Вертикальные литниковые системы:

1 – наливная воронка; 2 – горизонтальный литник; 3 – вертикальный литник;
4 – вертикальный сужающийся литник; 5 – питатель; 6 – отливка

Безнапорная литниковая система (рис. 1.12, б) характеризуется безнапорными впускными литниками и часто элементами литниковой системы, которые непосредственно подсоединены к впускным питателям. Безнапорные элементы литниковой системы не имеют полного давления металла (как в напорных литниковых системах) с начала заполнения формы. Давление растет во время заполнения формы, но не в той степени, как в напорных системах за тот же период времени.

Остальная часть литниковой системы герметична на всем пути до наливной воронки, и она рассчитывается по формуле свободного падения таким же образом, как и для напорной литниковой системы.

Поперечные сечения, ведущие к безнапорным литниковым элементам, являются, таким образом, поперечными сечениями, которые определяют время заливки.

Литниковая система, работающая при нормальном давлении (рис. 1.12, в), характеризуется нулевым давлением металла в литниках во время всей операции заливки, и полное давление металла в самом конце операции заливки, конечно, возрастает.

Горизонтальные и вертикальные литники, которые подводят металл к впускным питателям, обычно увеличивают на 10–20 % в поперечном сечении каждый раз, когда они производят поворот на 90° в направлении от впускных питателей и по всей длине до наливной воронки.

Таким образом, давление металла, которое создается его высотой, изменяется от верхней поверхности металла в наливной воронке до впускных питателей, активно действует во впускных питателях сразу после того, как литниковая система наполняется металлом. Это происходит через 1–3 с после начала заливки.

По этой причине литниковая система, работающая при нормальном давлении, часто называется открытой системой.

Таким образом, поперечные сечения верхних горизонтальных литников, которые находятся ближе всего к наливной воронке, являются теми поперечными сечениями, которые определяют время заливки.

Смешанная или гибридная литниковая система (рис. 1.12, з) характеризуется сочетанием, по крайней мере, двух из трех выше упомянутых литниковых систем.

На рис. 1.12, з, приведен пример смешанной литниковой системы, представляющей безнапорную литниковую систему (рассчитанную по этому способу), но впускные литники рассчитываются как напорные.

Если расчетные площади поперечных сечений хорошо просчитаны, тогда будет взаимодействие между безнапорной и напорной системами во время операции заливки и соответственно между собственными поперечными сечениями систем, которые определяют время заливки.

Проектирование литниковой системы осуществляется в процессе разработки технологии формовки. Прежде всего, устанавливается положение детали при заливке с учетом удобства формовки и сборки, вентиляции формы и стержней, техники заливки, кристаллизации и охлаждения. Одновременно предусматриваются меры, обеспечивающие получение плотных отливок и минимальных напряже-

ний. Выбирается место («тонкое» или «толстое») и способ (по разному форм, сифонный, дождевой или ярусный) подвода металла к отливке, после чего модели располагаются на плите и составляется конструктивная схема литниковой системы. Выбранная конструкция литниковой системы может быть рассчитана. Гидравлический расчет заключается в определении площади поперечных сечений и размеров литниковых каналов, исходя из условия заполнения формы за оптимальное время.

Для отливок, получающихся плотными без прибылей, такой расчет является достаточным. К ним относится большинство деталей из эвтектических сплавов и, в частности, из чугуна. Тепловые расчеты питающих элементов представляют отдельную задачу.

1.2. Требования к литниковым системам

Литниковые системы служат для заполнения форм металлом, а прибыли – для питания отливок в процессе кристаллизации. Прибыль конструктивно часто связана с литниковой системой, в этом случае элементы литниковых систем могут быть разделены на подводящие и питающие.

Размеры подводящих элементов определяются гидродинамическими факторами, а питающих элементов и прибыли – тепловыми факторами, геометрией отливки, ее массой, литейными свойствами сплава, а также требованиями, предъявляемыми к отливке.

В общем случае литниковая система должна отвечать следующим требованиям:

- обеспечивать заполнение формы в расчетный период времени с малой линейной скоростью (с целью предотвращения размыва формы и интенсивного перемешивания металла, вызывающих образование засора, окисных плен, газовых включений);
- препятствовать инжекции воздуха и газов из стенок формы потоком металла;
- задерживать шлак и другие неметаллические частицы;
- способствовать созданию необходимого теплового режима металла и формы с целью получения годных отливок (плотных, без трещин, с минимальными внутренними напряжениями) с чистой поверхностью (без пригара, ужимин, раковин);
- не затруднять усадку отливки;

– быть удобной при формовке, занимать мало места и обеспечивать высокий выход годного;

– легко отделяться от отливки и не вызывать больших затрат на обрубку и зачистку.

В зависимости от вида сплава, конструкции отливки и условий ее службы отдельные требования могут приобретать доминирующее значение или, наоборот, становиться второстепенными. Так, при производстве отливок из магниевых и высокопрочных алюминиевых сплавов, алюминиевых бронз, высокопрочных латуней и других сплавов с высокой реакционной способностью по отношению к кислороду требования минимального пленообразования в самой литниковой системе и ввода металла в полость формы с малой скоростью относятся к главным. Эти же требования приобретают второстепенный характер при литье серого чугуна или оловянистой бронзы, так как они плен не образуют. При литье стали главное внимание обращается на борьбу с усадочными дефектами, причем при разливке из стопорного ковша задача задержания шлака в литниковой системе вообще не ставится. Учет специфики производства отливок в ряде случаев может помочь созданию простых литниковых систем и одновременно увеличению выхода годного.

Выбор места подвода металла является одной из главных задач. Подвод металла в тонкое место отливки имеет целью выровнять скорость охлаждения тонкой и толстой частей отливки, что способствует уменьшению напряжений, а при отсутствии прибылей – и усадочных раковин.

Подвод металла в толстое место отливки позволяет создать последовательное (направленное) затвердевание для более успешного действия прибыли. Напряжения устраняются при этом медленным охлаждением отливки в форме или последующим отжигом. Для борьбы с напряжениями надо стремиться также к равномерному подводу металла по периферии отливки. К рассредоточенному подводу металла прибегают также с целью уменьшения нагрева плоских частей формы, образующих тонкие стенки отливки, что способствует уменьшению брака по ужиминам и раковинам.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТИПОВЫХ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Литниково-питающие системы (ЛПС) служат для обеспечения заполнения литейных форм металлом с оптимальной скоростью, исключающей образование в отливке недоливов и неметаллических включений и компенсирующей объемную усадку в период затвердевания отливки с получением в ней металла заданной плотности. ЛПС должна также удовлетворять требованиям технологичности при изготовлении моделей, форм и отливок. При этом необходимо стремиться к созданию по возможности компактных ЛПС. Излишнее их развитие ведет к перерасходу металла, завышению затрат труда, низкой эффективности использования оборудования и площадей.

К типовым литниковым системам относятся: горизонтальные, боковые, сифонные, верхние и дождевые. Для их расчета используют упрощенные методы, основанные на следующих допущениях:

- расплав рассматривается как идеальная жидкость с постоянной вязкостью, охлаждение расплава и нагрев формы при ее заполнении не учитываются;
- движение расплава рассматривается как установившееся движение тяжелой жидкости по закрытым и открытым каналам.

При конструировании литниковой системы необходимо придерживаться ряда правил, направленных на обеспечение требований к литниковым системам.

1. Протяженность каналов литниковой системы должна быть максимально короткой и жидкий металл необходимо подводить к полости формы кратчайшим путем.

2. Поток металла, подводимый в полость формы, должен быть направлен вдоль стенки отливки или касательно к ней.

3. Подвод металла должен обеспечивать одностороннее движение металла в форме.

4. Нежелательно размещать элементы литниковой системы вблизи знаковых частей стержней, холодильников, а также жеребеек.

5. Подвод металла осуществляют в наиболее массивную часть отливки, если толщина ее стенок различается незначительно, и наоборот, металл подводят к тонким стенкам, если их толщины существенно различаются.

Конкретная литая деталь представляет собой оригинальную конструкцию, что приводит к необходимости создания самостоятельной ЛПС для каждой отливки. Вместе с тем литые детали имеют много общего в размерах стенок, узлов, их сочленений, благодаря чему открываются возможности для типизации конструкций ЛПС и выработки общих методов их расчета.

Расчет сводится к определению площади наименьшего сечения литниковой системы (стояка или питателя) с последующим определением (по соотношениям) площадей сечения остальных элементов системы.

Для сужающихся литниковых систем площадь наименьшего сечения F_n находят по формуле (метод Озанна–Диттерта)

$$F_n = \frac{G}{\rho t \mu \sqrt{2gH_p}}, \quad (2.1)$$

где G – масса отливки с литниковой системой, кг;

ρ – плотность заливаемого расплава, кг/м³;

t – продолжительность заливки формы, с;

μ – коэффициент расхода расплава, учитывающий потери на трение, повороты в литниковой системе;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

H_p – расчетный статический напор, м.

Для определения массы отливки с литниковой системой на чертеж детали наносятся литейно-модельные указания: плоскость разъема, положение отливки в форме, припуски на механическую обработку, уклоны, галтели, конфигурация стержней, стержневые знаки, зазоры между формой и стержнем. Определяются заливаемые отверстия, технологические приливы, расположение прибылей, питающих бобышек и др. На основании литейно-модельных указаний определяются габаритные размеры моделей, разрабатывается эскиз расположения моделей на подмодельной плите и конструкция литниковой системы, по которым определяются длины питателей и шлакоуловителей. Выбираются номинальные размеры опок в свету.

Номинальные размеры опок в свету зависят от конструкции литниковой системы, габарита моделей, необходимых минимальных толщин слоя формовочной смеси между моделями и стенками опок,

между моделями, между моделью и шлакоуловителем, которые зависят от массы отливки и выбираются по табл. 2.1.

Таблица 2.1

Минимальные толщины слоев формовочной смеси на различных участках опоки

Масса отливки, кг	Минимально допустимая толщина слоя, мм				
	от стенки опоки до модели	между моделями	между моделью и шлакоуловителем	от верха модели до верха опоки	от низа модели до низа опоки
До 5	20	30	30	4	50
6–10	30	40	30	50	60
11–25	40	50	30	60	70
26–50	50	60	40	70	90
51–100	60	70	50	90	100
101–250	70	100	60	100	120
251–500	80	–	70	120	150
501–1000	90	–	120	150	200
1001–2000	100	–	150	200	250
2001–3000	125	–	200	250	300
3001–4000	150	–	225	275	350
4001–5000	175	–	250	300	370
5001–10000	200	–	250	350	400
Более 10000	250	–	250	400	450

Полученные данные позволяют определить минимальные размеры опок, которые окончательно уточняют по ГОСТ 2133–75 (рис. 2.1, 2.2). На практике рассматривается несколько типоразмеров опок и выбирается размер опоки, в которой содержится минимальное количество формовочной смеси, затраченной на единицу массы получаемых отливок.

длина или диаметр опки в свету, мм	высота опки, мм																		
	50	75	100	120	150	175	200	250	300	360	400	450	500	560	600	710	800	900	1000
300	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
360	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
400	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
450	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
500	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
560	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
600	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
630	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
710	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
750	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
800	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
900	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1000	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1100	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1200	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1400	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1500	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1600	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1800	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2000	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2200	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2500	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2600	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2800	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3000	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3200	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3600	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3800	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4000	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Рис. 2.2. Высота опок

При разработке технологии на конкретную автоматическую линию применяются размеры опок, используемые на данной линии.

Продолжительность заливки формы (τ) определяют по формулам, полученным в результате обобщения опыта работы различных литейных цехов. Для сложных по конфигурации, тонкостенных отливок массой до 500 кг время заливки рекомендуется определять по формуле

$$\tau = S\sqrt{G}, \quad (2.2)$$

где S – коэффициент, зависящий от толщины стенки отливки; при толщине стенок 2,5–3,5; 3,5–6,0 и 8–15 мм соответственно равен 1,66, 1,85 и 2,2.

Для средних и крупных отливок

$$\tau = S\sqrt[3]{G\delta}, \quad (2.3)$$

где δ – преобладающая толщина стенки отливки, мм; при δ до 10; 10–20; 20–40; 40 и более мм коэффициент S соответственно равен 1,0; 1,35; 1,50; 1,70.

Расчетный статический напор H_p зависит от типа литниковой системы, положения отливки в форме, способа заливки и других факторов и определяется из соотношения

$$H_p = H_0 - \frac{P^2}{2C},$$

где H_0 – высота стояка от уровня металла в литниковой воронке или чаше до места подвода металла в форму, м;

P – расстояние от верхней точки отливки до уровня подвода расплава в форму, м;

C – высота отливки в форме, с.

Для сифонной литниковой системы (рис. 2.3, *а*), когда $P = C$, $H_p = H_0 - C/2$. При подводе металла сверху (рис. 2.3, *б*) $P = 0$, $H_p = H_0$.

В случае симметричного расположения отливки относительно плоскости разъема и подвода металла в ней (рис. 2.3, *в*) $P = C/2$, $H_p = H_0 - C/8$.

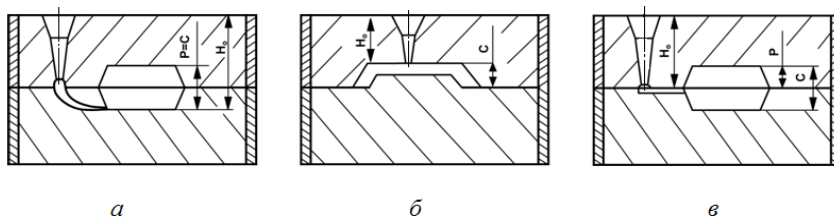


Рис. 2.3. К расчету статического напора различных конструкций литниковых систем:
а – сифонная; *б* – верхняя; *в* – боковая

Значение коэффициента расхода литниковой системы (μ) определяют по справочным таблицам. Для чугуна при заливке в сырую форму применяют $\mu = 0,35-0,50$; в сухую – $0,41-0,60$; для стали соответственно $0,25-0,42$ и $0,30-0,50$.

Площади сечений других элементов литниковой системы для отливок из серого чугуна рассчитывают из соотношений

$$F_{\Pi} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1 : 1,2 : 1,4, \quad (2.4)$$

где $F_{\text{шл}}$ – площадь сечения шлакоуловителя;

$F_{\text{ст}}$ – площадь сечения стояка в самом узком месте.

При использовании в литниковой системе фильтровальной сетки площадь ее пропускного сечения ($F_{\text{ф.с.}}$) определяют из соотношения

$$F_{\Pi} : F_{\text{ф.с.}} = 1:1 \quad (1:0,7).$$

Для тонкостенных отливок пользуются соотношением

$$F_{\Pi} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1:1,06:1,11.$$

При определении площадей сечения литниковой системы для стальных простых толстостенных отливок пользуются соотношением

$$F_{\Pi} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1:1,05:1,1,$$

а сложных тонкостенных – соотношением

$$F_{\Pi} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 1:1,1:1,2.$$

При выборе конструкции литниковой системы для отливок из цветных сплавов (алюминиевых, магниевых, медных) особое внимание уделяют спокойному заполнению формы расплавом. С этой целью применяют расширяющие литниковые системы, в которых наименьшим сечением служит стояк ($F_{\text{ст}}$), формула (2.1) примет следующий вид

$$F_{\text{ст}} = \frac{G}{\rho \tau \mu \sqrt{2gH_p}}.$$

При расчетах площадей остальных каналов литниковой системы пользуются следующими соотношениями:

для литья алюминиевых и магниевых сплавов

$$F_{\Pi} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 4 : 2 : 1(6 : 3 : 1),$$

для медных сплавов

$$F_{\Pi} : F_{\text{шл}} : F_{\text{ст}} = 2 : 2 : 1(4 : 4 : 1).$$

Зная площади сечений основных элементов литниковой системы, можно определить остальные их размеры.

Питатели и шлакоуловители имеют, как правило, трапецидальное поперечное сечение, площадь которого определяется по формуле

$$F_{n(\text{шл})} = \frac{a+b}{2} \cdot h_{n(\text{шл})}, \quad (2.5)$$

где a – большее основание трапеции, м;

b – меньшее основание трапеции, м;

$h_{n(\text{шл})}$ – высота питателя (шлакоуловителя), м.

Размеры питателей при расчете зависят от места присоединения его к отливке. В случае присоединения питателя к прибыли отливки принимаются следующие соотношения его размеров: $b = 0,7a$, $h_n = 1,25a$. Подставив их в формулу (2.5), получим размер большего основания

$$a = \sqrt{1,07F_n}.$$

В случае присоединения питателя непосредственно к отливке высота его должна быть на 3–5 мм меньше толщины стенки, к которой он присоединен, но не менее $h_{n \min}$.

Минимальная высота питателя для чугуновых отливок определяется по эмпирическому уравнению

$$h_{n \min} = 3,5 - 0,01[T_{\text{зал} \min} - (1670 - 124C_{\text{эКВ}})], \quad (2.6)$$

где $T_{\text{зал} \min}$ – минимальная температура заливки, К;

$C_{\text{эКВ}}$ – углеродный эквивалент.

Углеродный эквивалент зависит от положения чугуна относительно эвтектичной точки на диаграмме железо-углерод и может быть определен из выражения

$$C_{\text{экв}} = C_{\text{общ}} + 0,3 (\text{Si} + \text{P}),$$

где $C_{\text{общ}}$ – содержание углерода в чугуне;

Si, P – содержание в чугуне кремния и фосфора.

Значение углеродного эквивалента ($C_{\text{экв}}$) для серых чугунов марок СЧ15; СЧ20; СЧ25 принимают соответственно 4,25; 4,1; 3,85, для высокопрочных чугунов ВЧ45, ВЧ50 соответственно 3,9; 3,8, для ковких чугунов КЧ30; КЧ45 соответственно 3,1; 3,0.

Длина питателя выбирается в зависимости от конструкции литниковой системы, массы отливки, минимально допустимой толщины слоя смеси между моделью и шлакоуловителем (табл. 2.1) и берется по возможности минимальной.

В случае подвода расплава к отливке несколькими питателями рассчитанная площадь сечения питателя ($F_{\text{п}}$) является суммарной.

Для определения размеров сечения шлакоуловителя применяются такие же соотношения, как и для питателей, присоединенных к прибыли отливки. Поскольку для освобождения от неметаллических включений расплав должен пройти внутри шлакоуловителя определенное расстояние, его длину до питателя ($l_{\text{шл}}$) определяют по формуле

$$l_{\text{шл}} = 1,2 h_{\text{шл}} \frac{v_{\text{шл}}}{v_{\text{в}}}, \quad (2.7)$$

где $h_{\text{шл}}$ – высота сечения шлакоуловителя, м;

$v_{\text{шл}}$ – скорость сплава в шлакоуловителе, м/с;

$v_{\text{в}}$ – скорость всплытия частицы, м/с.

Скорость всплытия частиц ($v_{\text{в}}$) определяется из формулы

$$v_{\text{в}} = 2 \sqrt{\frac{d_{\text{шл}}}{3} \cdot \frac{\rho_{\text{Ме}} - \rho_{\text{шл}}}{\rho_{\text{Ме}}} \cdot g},$$

где $d_{\text{шл}}$ – диаметр частицы ($\sim 0,002$ м);

$\rho_{\text{Ме}}, \rho_{\text{шл}}$ – плотность соответственно расплава и неметаллической частицы (~ 4500 кг/м³), кг/м³;

g – ускорение силы тяжести, м/с.

Скорость расплава в шлакоуловителе рассчитывают по формуле

$$v_{\text{шл}} = \frac{G_{\text{ж}}}{\tau \cdot \rho_{\text{Ме}} \cdot F_{\text{шл}}}, \quad (2.8)$$

где $G_{\text{ж}}$ – масса жидкого металла в форме, кг;

τ – продолжительность заливки, с;

$F_{\text{шл}}$ – площадь поперечного сечения шлакоуловителя, м².

Если через шлакоуловитель расплав подводится к нескольким отливкам, то площадь его поперечного сечения ($F_{\text{шл}}$) умножается на количество отливок. При большой длине шлакоуловителя его делают ступенчатым, уменьшая его площадь после прохождения очередного питателя.

Диаметр стояка ($d_{\text{ст}}$) в самом узком месте определяют из выражения

$$d_{\text{ст}} = 2\sqrt{F_{\text{ст}} \frac{n}{\pi}},$$

где n – количество отливок в форме, шт.

По найденному значению ($d_{\text{ст}}$) определяют верхний диаметр стояка ($d_{\text{ст.в}}$), для расширяющегося стояка (машинная формовка) $d_{\text{ст}} = d_{\text{ст.в}}$, а для сужающегося (ручная формовка) $d_{\text{ст.в}} = d_{\text{ст}} + 2h_{\text{вкл}}$, где $h_{\text{вкл}}$ – основание уклона, определяемого по ГОСТ 3212–92.

По значению $d_{\text{ст.в}}$ определяют номер литниковой воронки (рис. 1.5, *а*), а ее размеры, которые применяются при массовом расходе расплава до 5 кг/с, по табл. 1.1. При больших расходах до 10 кг/с применяют формованные литниковые чаши (рис. 1.2), номер и размеры которых приведены на рис. 1.5, *б*, и в табл. 1.2. При расходах расплава до 50 кг/с используют чаши-нарощалки (рис. 1.4), номер и размеры которых выбирают по номограмме (рис. 1.5, *в*) и табл. 1.4.

После выбора литниковой воронки (чаши) и расчета сечений питателя, шлакоуловителя и стояка литниковой системы определяем ее массу ($G_{\text{л.с.}}$)

$$G_{\text{л.с.}} = G_{\text{п}} + G_{\text{шл}} + G_{\text{ст}} + G_{\text{л.ч.}} \quad (2.9)$$

где $G_{\text{п}}$ – масса питателей, кг;

$G_{\text{шл}}$ – масса шлакоуловителей, кг;

$G_{\text{ст}}$ – масса стояка, кг;

$G_{\text{л.ч.}}$ – масса литниковой чаши (воронки), кг.

Масса питателей (шлакоуловителей) определяется по формуле

$$G_{n(\text{шл.})} = F_{n(\text{шл.})} \cdot l_{n(\text{шл.})} \cdot \rho \cdot n,$$

где n – количество питателей (шлакоуловителей) в форме, ед.

Масса стояка и литниковой воронки определяется из выражения:

$$G_{\text{ст(лв.)}} = \frac{1}{3} \pi H (R_1^2 + R_1 \cdot R_2 + R_2^2) \cdot \rho, \quad (2.10)$$

где $H_{\text{ст}}$ – высота стояка (литниковой воронки), м.

Определив массу литниковой системы, уточняем время заливки (τ) и площади сечений элементов литниковой системы $F_{\text{п}}'$, $F_{\text{шл}}'$, $F_{\text{ст}}'$:

$$\tau' = S \sqrt{G + G_{\text{л.с.}}};$$

$$F_{\text{п}}' = \frac{G + G_{\text{лс}}}{\rho \tau' \mu \sqrt{2gH_{\text{п}}}}.$$

По полученным значениям определяем уточненную массу литниковой системы ($G_{\text{л.с.}'}$) по формулам (2.9)–(2.10).

Расчеты повторяются до тех пор, пока разница между последующим определением значения $G + G_{\text{л.с.}}$ и предыдущим не будет превышать 3 %, также уточняем длину шлакоуловителя до первого питателя по формуле (2.7).

2.1. Пример расчета типовой литниковой системы

В настоящей работе в качестве примера выполнен расчет литниковой системы, предназначенной для изготовления отливки детали «Сектор» (рис. 2.4) массой 1,0 кг.

На чертеж детали наносим литейно-модельные указания (рис. 2.4). Разрабатываем эскиз расположения моделей на подмодельной плите с учетом минимально допустимых толщин формовочной смеси согласно табл. 2.1. Для отливки массой до 5 кг минимально допу-

стимые толщины формовочной смеси будут следующими: между опокой и моделью – 20 мм, между моделями – 30 мм, между моделью и шлакоуловителем – 30 мм, от верха модели до верха опоки – 40 мм и от низа модели до низа опоки – 50 мм.

С учетом минимальных толщин формовочной смеси при размещении 12 отливок в форме необходимо занять площадь 660×510 мм. Полученные данные позволяют определить минимальный размер опоки в свету, который окончательно уточняется по ГОСТ 2133–75 (рис. 2.1, 2.2) и будет составлять 700×550 мм. Высоту опоки принимаем равной 250 мм, с учетом того, что в ней будут изготавливаться отливки большей высоты.

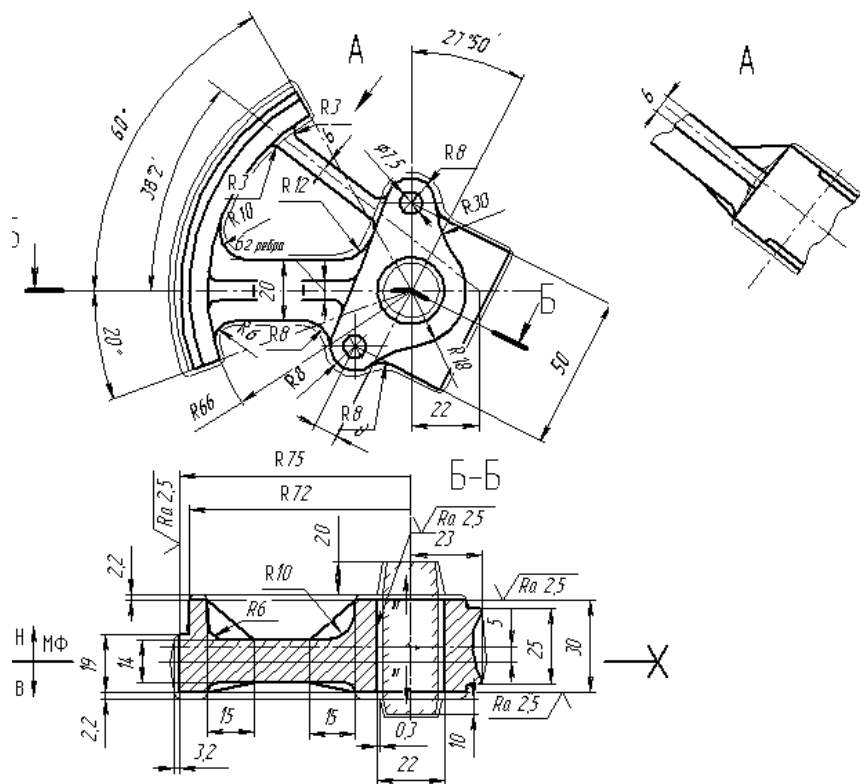


Рис. 2.4. Деталь «Сектор» с литейно-модельными указаниями

После расположения моделей разрабатываем конструкцию литниковой системы, которая будет состоять из трех шлакоуловителей, шести питателей, стояка с литниковой воронкой, и определяем их размеры (рис. 2.5). Длина шлакоуловителей, располагающихся между моделями, будет равна 352 мм, а между шлакоуловителями – 306 мм.

По формуле (2.2) определяем время заливки

$$\tau = 2,2 \cdot \sqrt{1,0 \cdot 12} = 7,6, \text{ с.}$$

Определяем статический напор H_p , для чего находим H_0 , которое будет равно высоте верхней опоки (так как питатели расположены в плоскости разъема), равной 250 мм, высоту отливки $C = 34,4$ мм и расстояние от места подвода металла до верха отливки $P = 12,2$ мм.

Выбираем значение коэффициента μ , для чугуна при заливке в сырую форму для данной литниковой системы $\mu = 0,4$.

По формуле (2.1) рассчитываем суммарную площадь сечения питателей (F_{Π}):

$$\sum F_{\Pi} = \frac{12}{7000 \cdot 7,6 \cdot 0,4 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,248}} = 0,00026, \text{ м}^2;$$

$$F_{\Pi} = \frac{0,00026}{12} = 0,000021, \text{ м}^2.$$

Определяем площади сечения шлакоуловителей и стояка для одной отливки из соотношения (2.4):

$$F_{\text{шл}} = 0,000021 \cdot 1,2 = 0,000025, \text{ м}^2;$$

$$F_{\text{ст}} = 0,000021 \cdot 1,4 = 0,000029, \text{ м}^2.$$

Находим массу питателей и шлакоуловителей. Длину питателей принимаем равной расстоянию между моделями, которое составляет 90 мм, а их количество равно 6.

$$G_{\Pi} = 0,000021 \cdot 0,090 \cdot 7000 \cdot 6 = 0,08, \text{ кг};$$

$$G_{\text{шл}}^1 = 0,000025 \cdot 6 \cdot 0,306 \cdot 7000 = 0,32, \text{ кг};$$

$$G_{\text{шл}}^2 = 0,000025 \cdot 4 \cdot 0,352 \cdot 7000 = 0,25, \text{ кг.}$$

Каждая ветвь шлакоуловителя питает 6 отливок, поэтому площадь сечения шлакоуловителя для одной отливки умножаем на 6.

Для определения массы стояка определяем его площадь сечения и диаметр в верхней части.

$$d_{\text{ст.в}} = 2\sqrt{0,000029 \cdot \frac{12}{3,14}} = 0,02 \text{ м} = 20, \text{ мм.}$$

По номограмме рис. (1.2, а) определяем номер литниковой воронки – № 2, а по табл. 1.4 – ее размеры: $d_{\text{ст.в.}} = 23$ мм, $h_r = D = 3 \cdot 23 = 69$, мм. Высота стояка $H_{\text{ст}} = 250 - 69 = 181$, мм.

По ГОСТ 3212–92 определяем величину уклона – 1,45 мм, нижний диаметр стояка $d_{\text{н}} = 23 + 2,9 = 26$, мм.

Определяем массу стояка и литниковой воронки:

$$G_{\text{ст}} = \frac{3,14 \cdot 0,023^2 + 3,14 \cdot 0,026^2}{8} \cdot 0,181 \cdot 7000 = 0,59, \text{ кг;}$$

$$G_{\text{л.в.}} = \frac{3,14 \cdot 0,023^2 + 3,14 \cdot 0,069^2}{8} \cdot 0,069 \cdot 7000 = 1,0, \text{ кг.}$$

Таким образом, масса литниковой системы будет равна

$$G_{\text{л.с.}} = 0,08 + 0,32 + 2 \cdot 0,25 + 0,59 + 1,0 = 2,49, \text{ кг.}$$

Определив массу литниковой системы по формуле (2.2), уточняем время заливки, а по формуле (2.1) – площадь сечения питателя.

$$\tau' = 2,2 \cdot \sqrt{1,0 \cdot 12 + 2,49} = 8,4, \text{ с.}$$

$$\sum F'_{\text{п}} = \frac{12 + 2,49}{7000 \cdot 8,4 \cdot 0,4 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,248}} = 0,00028, \text{ м}^2;$$

$$F'_{\text{п}} = \frac{0,00028}{12} = 0,000023, \text{ м}^2;$$

$$F'_{\text{шл}} = 0,000023 \cdot 1,2 = 0,000027, \text{ м}^2;$$

$$F'_{\text{ст}} = 0,000023 \cdot 1,4 = 0,000032, \text{ м}^2;$$

$$G'_{\text{ш}} = 0,000023 \cdot 0,090 \cdot 7000 \cdot 6 = 0,087, \text{ кг};$$

$$G'_{\text{шл}} = 0,000027 \cdot 6 \cdot 0,306 \cdot 7000 = 0,35, \text{ кг};$$

$$G'_{\text{шл}} = 0,000027 \cdot 4 \cdot 0,352 \cdot 7000 = 0,27, \text{ кг};$$

$$d_{\text{ст.в.}} = 2 \sqrt{0,000032 \cdot \frac{12}{3,14}} = 0,022 \text{ м} = 22, \text{ мм.}$$

Номер литниковой воронки не изменился, так как $d_{\text{ст.в.}} = 23$ мм у воронки № 2 больше расчетного, следовательно не изменилась масса стояка и литниковой воронки, а масса литниковой системы будет равна

$$G'_{\text{л.с.}} = 0,087 + 0,35 + 2 \cdot 0,27 + 0,59 + 1,00 = 2,57, \text{ кг.}$$

Разница масс литниковых систем, полученных в расчетах первого и второго вариантах, составляет 3 %, поэтому расчет литниковой системы заканчиваем.

Определим минимальную длину шлакоуловителя по формуле (2.7), при которой шлаковые частицы всплывут в верхнюю часть шлакоуловителя.

Скорость расплава в шлакоуловителе определяем по формуле (2.8):

$$v_{\text{шл.}} = \frac{12 + 2,57}{8,4 \cdot 7000 \cdot 0,00016 \cdot 6} = 1,55, \text{ м/с.}$$

Скорость всплытия шлака по формуле (2.8) $d_{\text{шл.}} = 0,002$ м и $\rho_{\text{шл.}} = 4500$ кг/м³.

$$v_{\text{в.}} = 2 \sqrt{\frac{0,002}{3} \cdot \frac{7000 - 4500}{7000}} \cdot 9,8 = 0,29, \text{ м/с};$$

$$l_{\text{шл}} = 1,2 \cdot 0,014 \cdot \frac{1,55}{0,29} = 0,089, \text{ м} = 89, \text{ мм.}$$

В соответствии с конструкцией литниковой системы (рис. 2.5) длина шлакоуловителя 1 от стояка до шлакоуловителя 2 составляет $306 : 2 = 153$ мм, а расстояние до первого питателя от шлакоуловителя 2 равно 60 мм, поэтому шлаковая частица должна находиться в верхней части шлакоуловителя, что предотвращает возможность образования шлаковых включений по вине литниковой системы.

Найдем минимальную высоту питателя по формуле (2.6) при $T_{\text{зал.}} = 1340$ °С:

$$h_{\text{п min}} = 3,5 - 0,01[(1340 - 273) - (1670 - 124 \cdot 4,1) - 100] = 5,5, \text{ мм.}$$

Принимаем высоту питателя 5,5 мм.

С целью анализа эффективности разработанной литниково-питающей системы выполняем моделирование литейных процессов получения отливки «Сектор».

На основании выполненных расчетов с использованием пакета Solid Works создаем трехмерную модель отливки с литниково-питающей системой (рис. 2.5).

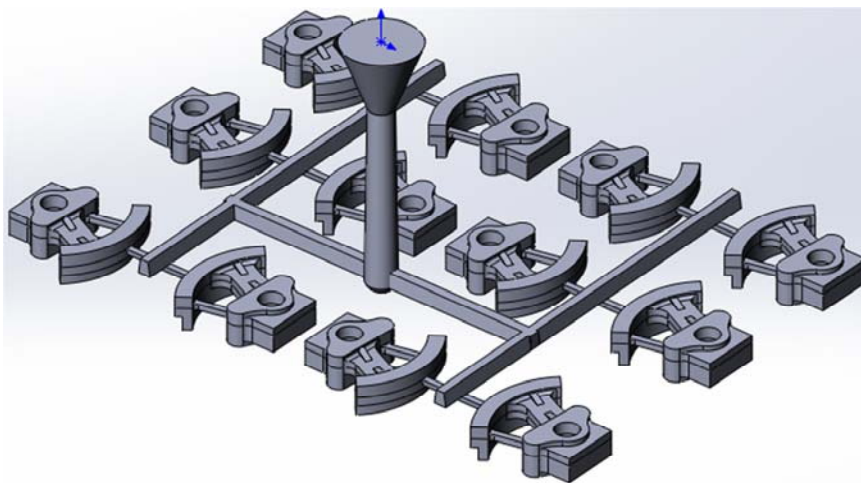


Рис. 2.5. 3D-модель отливок с литниково-питающей системой

Генерацию конечно-элементной сетки выполняем с использованием пакета ProCAST, модуль MeshCAST. Сам процесс заключался в подборе оптимальных параметров элементарных объемов. Моделирование литейных процессов проводим с использованием пакета ESI ProCast. Этот программный пакет позволяет моделировать тепловые процессы при затвердевании отливки, а также процессы образования усадочных раковин, макропористости и микропористости, гидродинамические процессы при заливке формы расплавом, формирование и расчет любых «критериев качества» для прогноза структуры отливки, возможности образования пригара, размыва формы, механических свойств, напряжений, трещин и др. Моделирование литейных процессов основано на методе конечных элементов (МКЭ), в котором использованы наиболее адекватные физические и геометрические модели. Работа с сеткой построена по модульному принципу: предпроцессорные модули, предназначенные для задания начальных и граничных условий и подготовки геометрических моделей к проведению расчетов литейных процессов; процессорные модули, в которых непосредственно выполняются расчетные операции; постпроцессорные модули предназначены для обработки и анализа результатов моделирования.

Подготовка файлов, описывающих начальные и граничные условия, проводится с использованием модуля «PreCAST» «ProCAST». Модуль «PreCAST» является предпроцессорным модулем систем автоматизированного моделирования «ProCAST». Программа предназначена для подготовки всех негеометрических данных для численных расчетов в процессорных модулях типа «Fraction Solid» и «Flow». Одна из важнейших функций программы – подготовка файлов со свойствами сплавов и материалов. Модуль «PreCAST» позволяет синтезировать теплофизические свойства железоуглеродистых и цветных сплавов по задаваемому химическому составу. Начальные и граничные условия, использованные при моделировании литейных процессов технологии изготовления отливки «Сектор», приведены в табл. 2.2, 2.3, 2.4. Результаты моделирования представлены на рис. 2.6.

В результате моделирования установлено, что время затвердевания до температуры $T_{\text{сол}}$ составляет 53 с. Анализ усадочных дефектов показал (рис. 2.6), что усадочные раковины образуются в теле отливки, глубина усадки составляет 5–7 мм, а вероятность образо-

вания более 80 %. Таким образом, разработанная конструкция литниковой системы не позволит изготавливать годные отливки для детали «Сектор».

Таблица 2.2

Теплофизические свойства литейной формы

Материал литейной формы	Теплоемкость c , кДж/м ³ ·°С	Теплопроводность λ , Вт/м·°С
Сырые песчано-глинистые смеси (литье в землю)	700	26–27

Таблица 2.3

Теплофизические свойства СЧ20

Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость c , Дж/кг·°С	Теплопроводность λ , Вт/м·°С	$T_{лик}$, °С	$T_{сол}$, °С
7100	3,3–3,5	54	1180	1080

Для устранения выявленных недостатков необходимо предусмотреть в конструкции ЛПС установку питающих бобышек. Для этого с учетом объема образующейся усадочной раковины и объема питаемого узла определяем форму и объем питающей бобышки, обеспечивающей изготовление бездефектной отливки. Также необходимо с учетом предусмотренных питающих бобышек выполнить повторный расчет ЛПС.

Таблица 2.4

Начальные условия

Температура заливки T_c , °С	Температура литейной формы T_f , °С	Линейная скорость заливки v , м/с	Коэффициент теплоотдачи между отливкой и формой, Вт/м ² ·с
1340	20	0,3	500

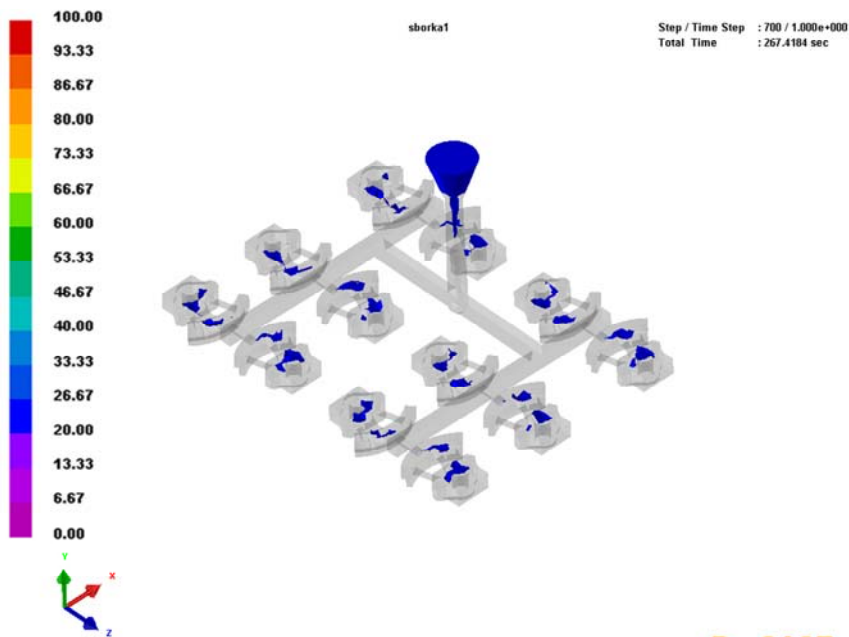


Рис. 2.6. Результаты моделирования

Так как выбранному материалу отливки «Сектор» СЧ20 ГОСТ 1412–85 характерна объемная усадка в размере 1,2 % и по результатам моделирования были выявлены усадочные дефекты, то в первую очередь расчет начинаем с узла питания отливки.

Диаметр питающей бобышки определяем по номограмме, учитывающей массу и толщину стенки отливки (рис. 5.25) [3, с. 329], а площадь шейки по табл. 5.11 [3, с. 330].

Из номограммы диаметр питающей бобышки $D_6 = 66$ мм. Значение площади сечения шейки бобышек $S_{ш} = 7$ см².

После установки питающих бобышек изменилась масса литниково-питающей системы. Определив массу бобышек, уточняем время заливки, а по формуле (2.1) – площадь сечения питателя.

$$\tau' = 2,2 \cdot \sqrt{1,0 \cdot 12 + 2,49 + 0,7 \cdot 6} = 9,5, \text{ с};$$

$$\sum F'_{\Pi} = \frac{12 + 2,49 + 4,2}{7000 \cdot 9,5 \cdot 0,4 \sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 0,248}} = 0,00032, \text{ м}^2;$$

$$F'_{\Pi} = \frac{0,00032}{12} = 0,000026, \text{ м}^2;$$

$$F'_{\text{шп}} = 0,000026 \cdot 1,2 = 0,000031, \text{ м}^2;$$

$$F'_{\text{ст}} = 0,000026 \cdot 1,4 = 0,000036, \text{ м}^2;$$

$$G'_{\Pi} = 0,000026 \cdot 0,090 \cdot 7000 \cdot 6 = 0,098, \text{ кг};$$

$$G'_{\text{шп}} = 0,000031 \cdot 6 \cdot 0,306 \cdot 7000 = 0,4, \text{ кг};$$

$$G'_{\text{ст}} = 0,000031 \cdot 4 \cdot 0,352 \cdot 7000 = 0,31, \text{ кг};$$

$$d_{\text{ст.в.}} = 2 \sqrt{0,000036 \cdot \frac{12}{3,14}} = 0,023 \text{ м} = 23, \text{ мм}.$$

Номер литниковой воронки не изменился, так как $d_{\text{ст.в.}} = 23$ мм, не изменилась и масса стояка и литниковой воронки.

Далее повторно проверяем эффективность разработанной литниковой системы путем моделирования литейных процессов.

В программе SolidWorks создаем трехмерную модель отливки с питающими бобышками (рис. 2.7).

Результаты повторного моделирования литейных процессов (рис. 2.8) новой литниковой системы с питающими бобышками позволили установить, что образующиеся усадочные дефекты располагаются в стояке и питающих бобышках.

Таким образом, результаты уточненного расчета литниковой системы с применением питающих бобышек и последующее моделирование литейных процессов технологии изготовления отливки «Сектор» позволяют разработать эффективную технологию получения отливок без усадочных дефектов.

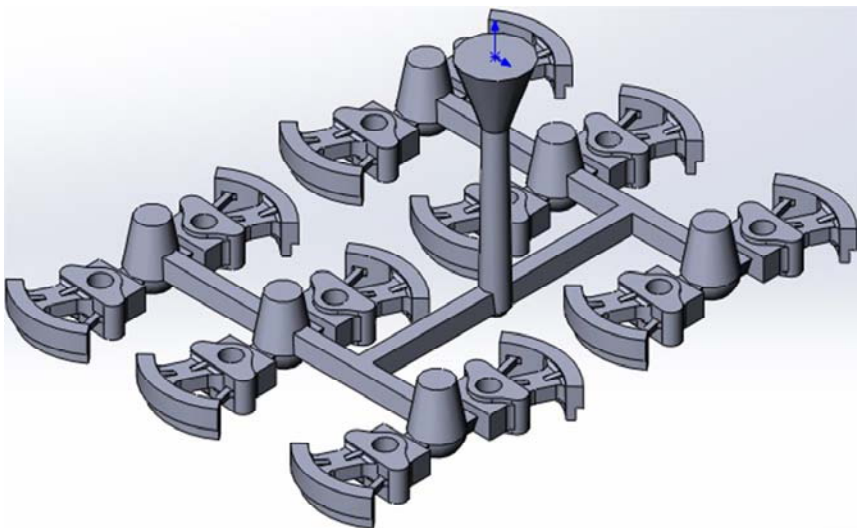


Рис. 2.7. Модели отливок с литниково-питающей системой

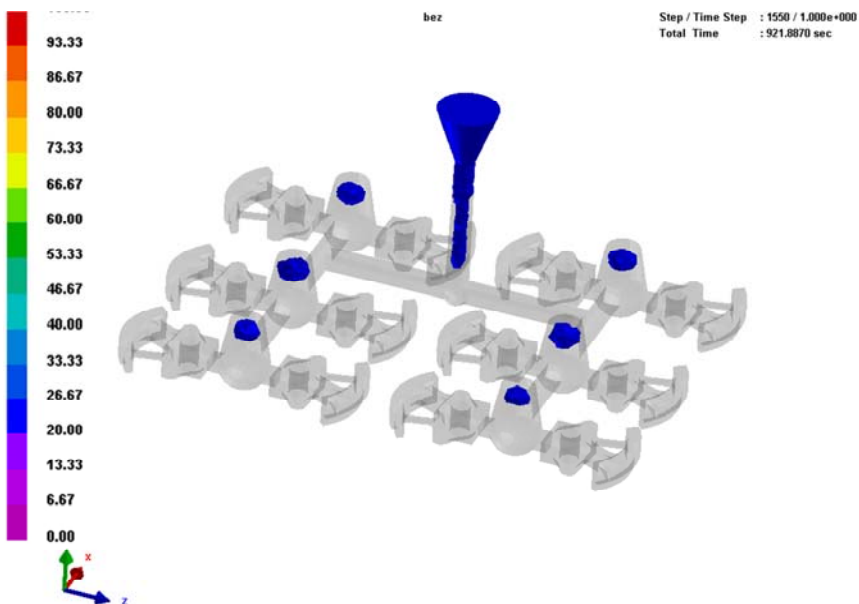


Рис. 2.8. Результаты моделирования

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДРОССЕЛЬНОЙ ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ

Дроссельные литниковые системы позволяют гибко регулировать продолжительность заполнения формы расплавленным металлом путем изменения площади сечения дросселя, который создает гидравлическое сопротивление расплаву и снижает его линейную скорость. Такие литниковые системы применяются, как правило, при получении толстостенных отливок.

Расчет дроссельной литниковой системы производится в следующем порядке.

1. На чертеж детали наносятся литейно-модельные указания и определяется масса отливки. Разрабатывается эскиз конструкции дроссельной литниковой системы, которая зависит от количества отливок в форме и их расположения. При расположении отливок по одну сторону от стояка применяются односторонние дроссели, которые могут быть одноходовыми (рис. 3.1), двухходовыми (рис. 3.2) или трехходовыми (рис. 3.3), в зависимости от массового расхода расплава. Если отливки располагаются по обе стороны от стояка, используются двухсторонние дроссели, одноходовые (рис. 3.4) или двухходовые (рис. 3.5). При расположении отливок по четырем сторонам от стояка выбираются крестообразные дроссели (рис. 3.6). Определяются размеры опок по методике, описанной в разделе 1.2.

2. Определяется средний массовый расход расплава ($m_{т.с.}$) и продолжительность заливки (τ) по номограмме, приведенной на рис. 3.7, *a*, *б*, при определенном режиме заполнения формы (быстро, нормально, медленно). Быстрая заливка применяется при изготовлении тонкостенных и сложных по конфигурации отливок; для отливок с большими плоскостями поверхности вне зависимости от толщины стенок. Медленная заливка рекомендуется для толстостенных отливок из серого чугуна; при заливке в сырую форму отливок с высокими вертикальными массивными частями в нижней опоке; при заливке перегретым расплавом отливок, имеющих большие стержни и относительно малые знаковые части. В остальных случаях используется нормальная заливка.

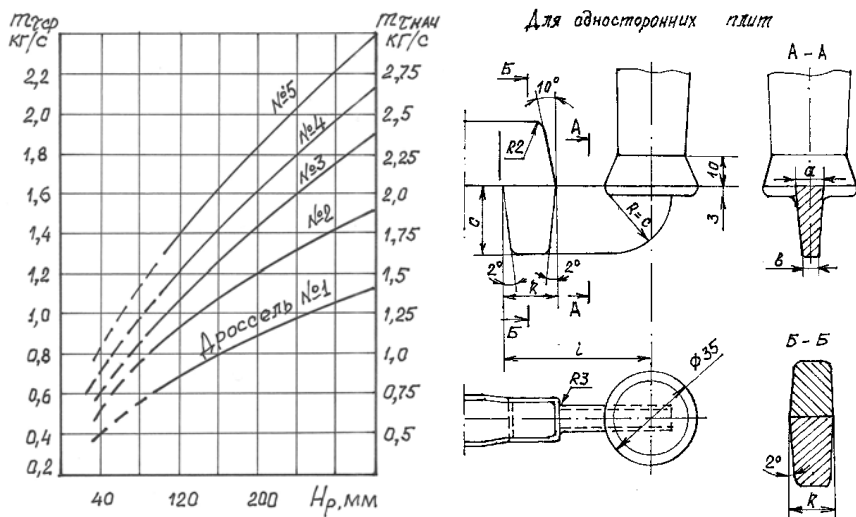


Рис. 3.1. Дроссели односторонние одноходовые

Таблица 3.1

Размеры односторонних одноходовых дросселей, мм

Номер дросселей	$F_{др,2}$ мм ²	$a^{+0,2}$	$b^{+0,2}$	$c^{+0,2}$	i	k
1	100	4,5	3,6	24,6	45	15
2	150	5,5	4,5	30	45	15
3	150	7,0	6,2	22	48	18
4	200	7,0	6,0	30,8	48	18
5	250	9,0	8,0	29,4	53	23

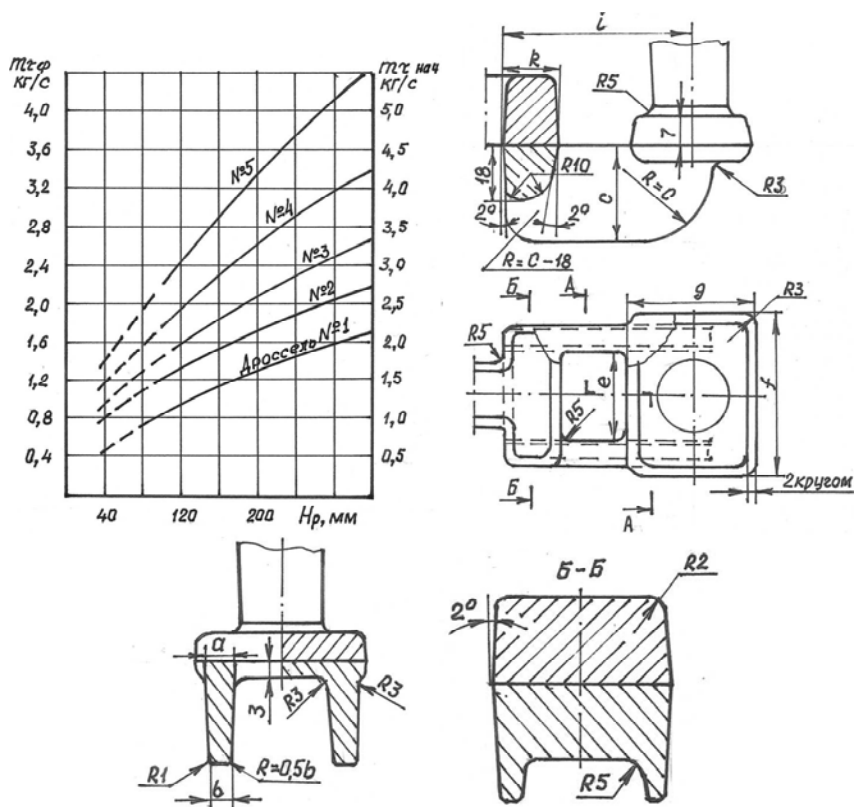


Рис. 3.2. Дроссели односторонние двухходовые

Таблица 3.2

Размеры односторонних двухходовых дросселей, мм

Номер дросселей	$\Sigma F_{др.}$, мм ²	$a^{+0,2}$	$b^{+0,2}$	$c^{+0,2}$	e	f	g	i	k
1	200	4,5	3,6	24,6	30	45	40	52	15
2	250	5,5	4,6	24,6	30	47	40	52	15
3	300	5,5	4,5	30,0	30	47	40	52	15
4	400	7,0	6,0	30,8	30	50	40	57	20
5	500	9,0	8,0	29,4	30	54	40	60	20

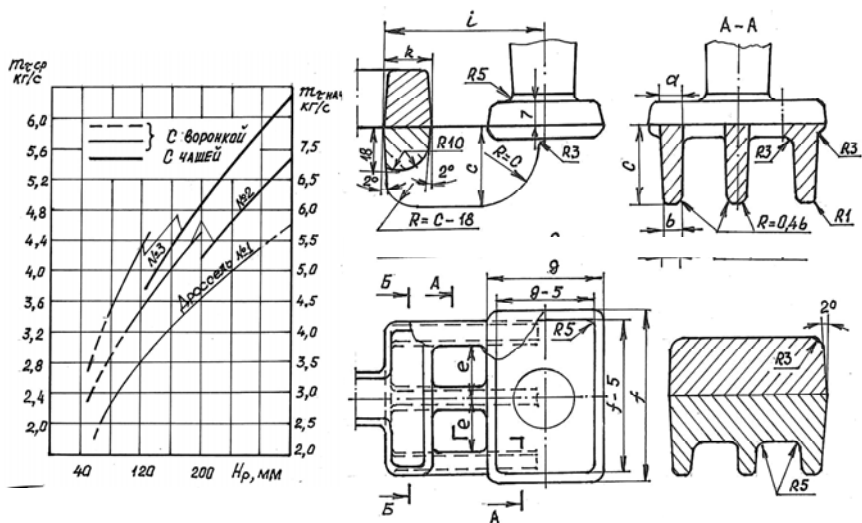


Рис. 3.3. Односторонний трехходовой дроссель

Таблица 3.3

Размеры односторонних трехходовых дросселей, мм

Номер дросселей	$\Sigma F_{дрос.}, \text{мм}^2$	$a^{+0,2}$	$b^{+0,2}$	$c^{+0,2}$	e	f	g	i	k
1	515	10,0	9,5	17,6	25	76	46	62	20
2	700	10,0	9,2	24,3	35	96	50	62	20
3	855	10,0	9,0	30,0	35	96	50	62	20

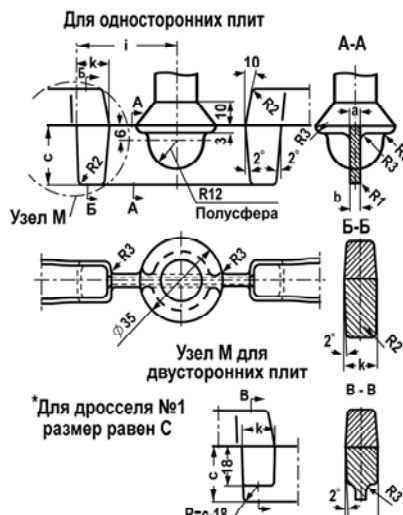
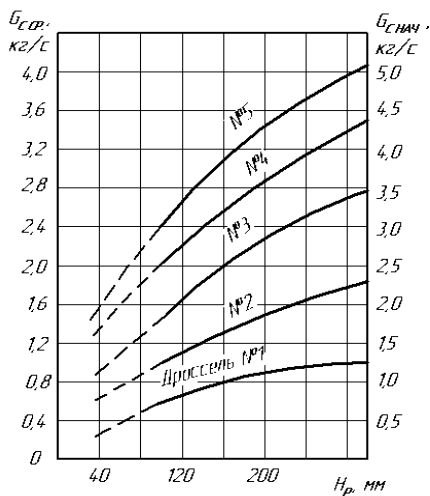


Рис. 3.4. Двухсторонние одноходовые дроссели

Таблица 3.4

Размеры двухсторонних одноходовых дросселей, мм

Номер дросселей	$F_{др,2}$ мм ²	$a^{+0,2}$	$b^{+0,2}$	$c^{+0,2}$	i	k
1	100	4,5	4,1	11,6	45	15
2	200	4,5	3,6	24,6	45	15
3	300	5,5	4,5	30,0	45	15
4	400	7,0	6,0	30,8	48	18
5	500	9,0	8,0	29,4	50	18

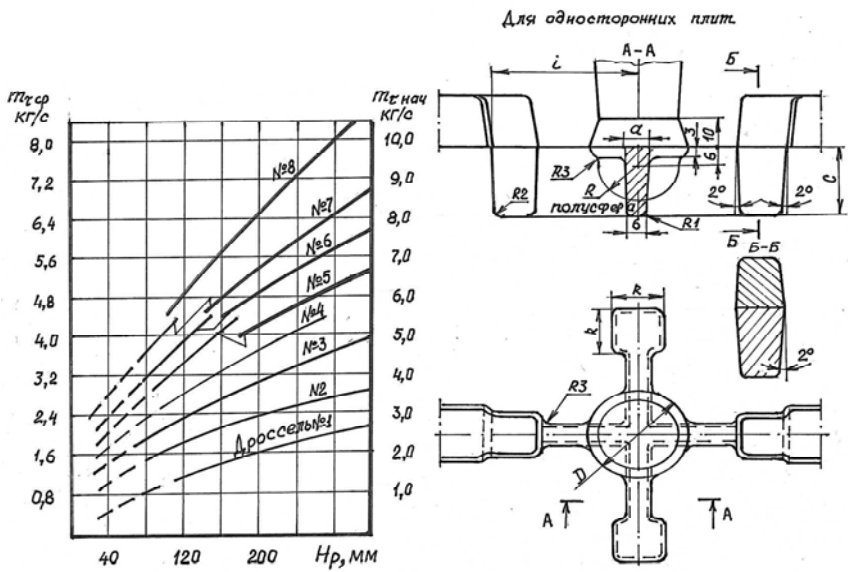


Рис. 3.6. Крестообразные дроссели

Таблица 3.6

Размеры крестообразных дросселей, мм

Номер дросселей	$\Sigma F_{др.}$, мм ²	$a^{+0,2}$	$b^{+0,2}$	$c^{+0,2}$	D	i	k	R
1	200	4,5	4,1	11,6	35	45	15	12,0
2	300	4,5	3,9	18,0	35	45	15	12,0
3	400	4,5	4,0	24,6	35	45	15	12,0
4	500	5,5	4,6	24,6	40	50	15	15,0
5	600	5,5	4,5	30,0	40	50	15	15,0
6	680	7,0	6,1	26,0	45	55	18	17,5
7	800	7,0	6,0	30,8	45	55	18	17,5
8	1000	9,0	8,0	29,4	50	60	18	20,0

Для определения $m_{\tau \text{ ср.}}$ на оси абсцисс откладывается масса отливок в форме и проводится перпендикуляр до пересечения с линией определенного режима заполнения формы. От точки пересечения проводится горизонталь до пересечения с осью ординат, где указаны значения $m_{\tau \text{ ср.}}$.

Массовый расход металла можно определить из выражения

$$m_{\tau \text{ ср.}} = \frac{G}{\tau}, \text{ кг/с,}$$

где G – масса отливок в форме, кг;

τ – продолжительность заливки, с.

Продолжительность заливки (τ) определяется по формулам (2.2), (2.3) или по номограмме (рис. 3.7, а).

3. Определяется начальный расход ($m_{\tau \text{ нач.}}$) по формуле

$$m_{\tau \text{ нач.}} = K \cdot m_{\tau \text{ ср.}},$$

где K – коэффициент, учитывающий геометрические размеры формы.

Коэффициент K определяется по графику, представленному на рис. 3.8, или по формуле (3.1).

$$\frac{m_{\tau \text{ нач.}}}{m_{\tau \text{ ср.}}} = 1 + \frac{P}{C} \cdot \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \frac{P}{H}}}. \quad (3.1)$$

Для определения коэффициента K необходимо рассчитывать отношения P/C и P/H . После этого на оси абсцисс откладывается значение отношения P/C и из этой точки проводится перпендикуляр до линии, соответствующей отношению P/H . От точки пересечения проводится горизонталь до пересечения с осью ординат, где указано значение коэффициента K .

4. По значению $m_{\tau \text{ нач.}}$ выбирается номер и размеры литниковой воронки: при $m_{\tau \text{ нач.}} \leq 5$ кг/с (табл. 1.1) размеры формуемой чаши (рис. 1.2, табл. 1.2), при $m_{\tau \text{ нач.}} \leq 10$ кг/с или чаши-нарощалки при $m_{\tau \text{ нач.}} \leq 50$ кг/с (рис. 1.4, табл. 1.4).

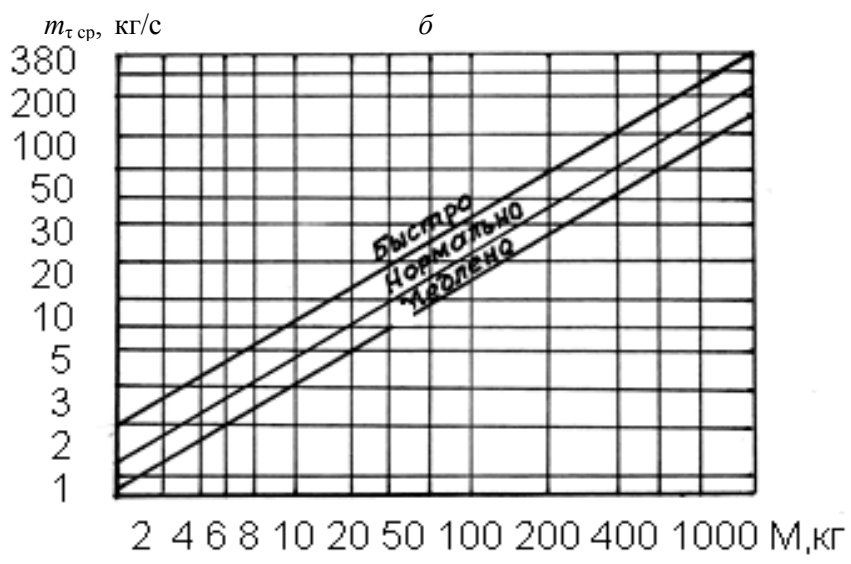
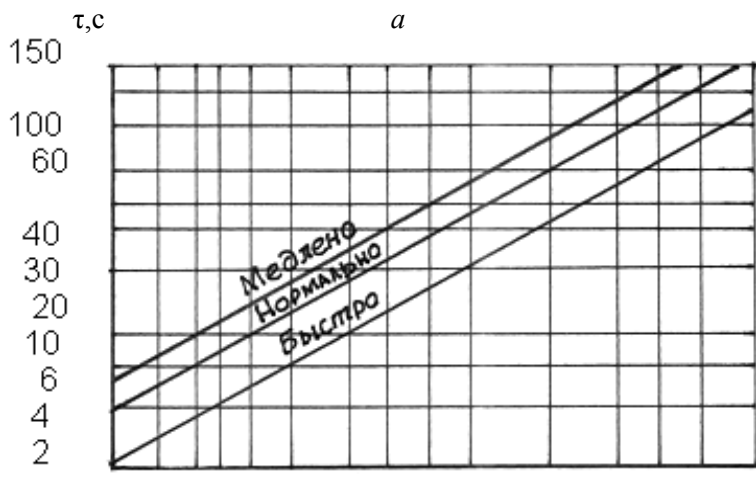


Рис. 3.7. Определение среднего массового расхода расплава и продолжительности заливки

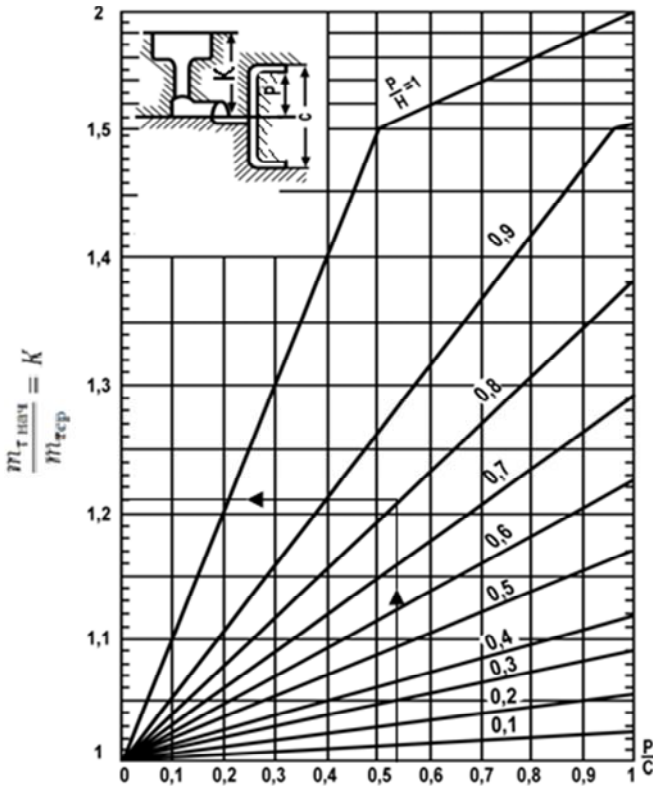


Рис. 3.8. График для определения коэффициента K

5. Определяется площадь сечения шлакоуловителя. На оси ординат (рис. 3.9) откладывают значение $m_{т нач}$ и проводят горизонталь до пересечения с линией шлакоуловителя. От точки пересечения опускают вертикаль через ось абсцисс до нижней кривой. От точки пересечения вертикали с нижней кривой проводят горизонталь влево до оси ординат, на которой отложены размеры нижнего основания шлакоуловителя, а остальные размеры трапеции определяются по эскизу, расположенному на нижнем графике (рис. 3.9). Площадь сечения шлакоуловителя находится на оси абсцисс в месте пересечения с вертикалью. Площадь сечения одной ветви шлакоуловителя не рекомендуется делать меньше 200 мм^2 .

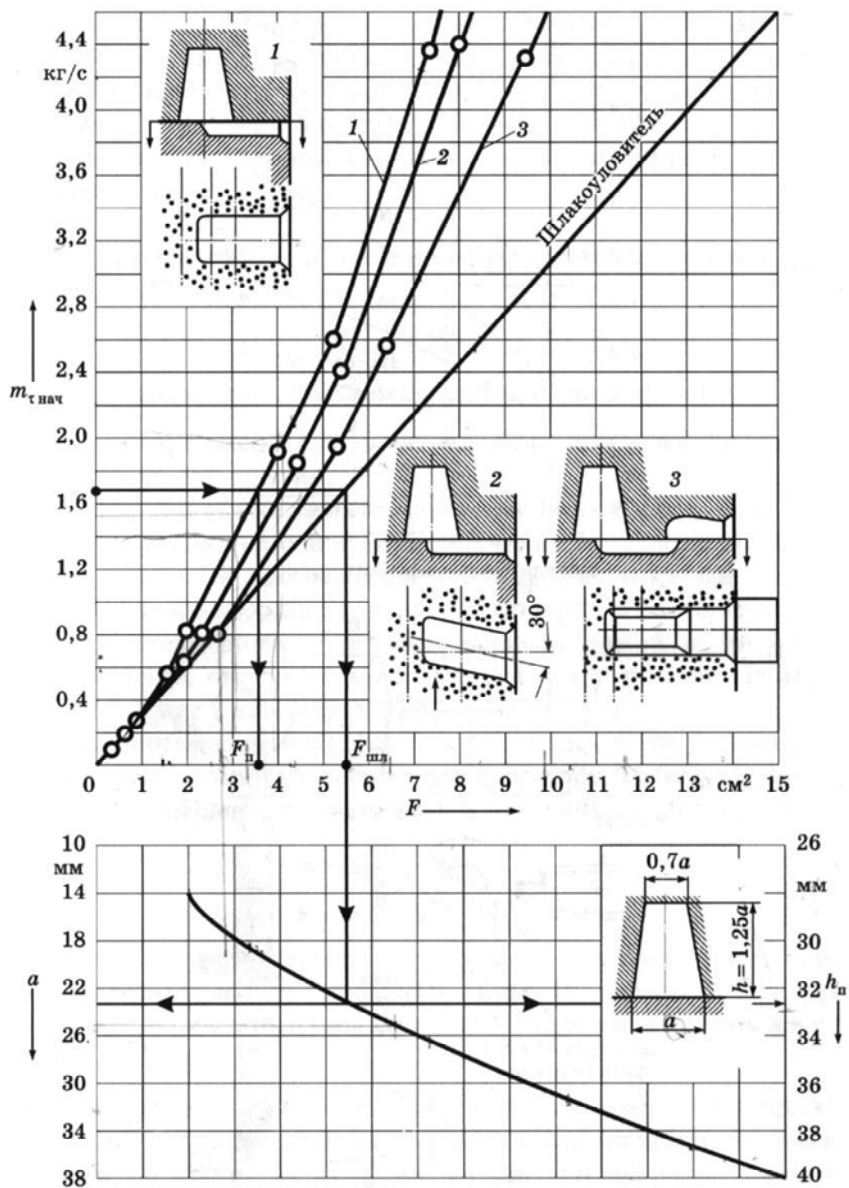


Рис. 3.9. Графики для определения суммарной площади сечения шлакоуловителя и питателя

6. Определяется суммарная площадь питателей. Пользуясь рис. 3.9 и горизонталью, проведенной ранее, выбирают одну из трех кривых (1, 2, 3), соответствующую выбранной конструкции питателя, и опускают перпендикуляр до пересечения с осью абсцисс. Эта точка соответствует значению суммарной площади питателей, присоединенных к шлакоуловителю или его ветви. Количество питателей и площадь сечения каждого из них обусловлены расположением моделей и особенностями конструкции отливок. Высота питателей не должна быть больше 1/5 высоты шлакоуловителя во избежание засасывания шлака в полость формы.

7. Определяют расчетный статистический напор ($H_{\text{расч.}}$):

$$H_{\text{расч.}} = H_0 - h_{\text{п}},$$

где H_0 – высота стояка от уровня металла в литниковой воронке или чаше до места подвода расплава металла в форму, мм;

$h_{\text{п}}$ – пьезометрический напор перед первым питателем, мм.

Пьезометрический напор находится по нижнему графику (рис. 3.9) на правой оси ординат.

8. По требуемому начальному расходу ($m_{\text{т нач.}}$), напору ($H_{\text{расч.}}$) и выбранному типу дросселя определяют номер дросселя и его размеры. Для этого на оси абсцисс (рис. 3.1–3.6) находят значение $H_{\text{расч.}}$, а на оси ординат – массовый расход ($m_{\text{т нач.}}$). Пересечение координат дает точку, лежащую на одной из кривой или между ними. По кривой, расположенной ближе к найденной точке, определяют номер дросселя и по этому номеру в табл. 3.1–3.6 (рис. 3.1–3.6) находят его размеры.

Если пересечение координат дает точку, отстоящую по вертикали далеко от кривых табличных дросселей, то берут ближайший большой дроссель, а его высоту (C) пересчитывают по формуле

$$C' = C \frac{m'_{\text{т нач.}}}{m_{\text{т нач.}}},$$

где C' – высота пера нужного дросселя, мм;

C – высота пера табличного дросселя, мм;

$m_{\text{т нач.}}$ – желаемый массовый расход при напоре $H_{\text{расч.}}$;

$m'_{\tau \text{ нач.}}$ – массовый расход табличного дросселя при том же давлении $H_{\text{расч.}}$.

9. После определения номера дросселя и его площади, проверяется площадь стояка, которая в самом узком месте должна быть больше площади дросселя. Увеличение диаметра стояка по сравнению с табличным не требует изменения остальных размеров литниковой системы, так как расход остается расчетным и регламентируется дросселем.

3.1. Пример расчета дроссельной литниковой системы

В качестве примера рассмотрим расчет дроссельной литниковой системы для детали «Крышка» массой 14,2 кг с габаритными размерами $310 \times 215 \times 60$, изготавливаемой из чугуна СЧ20 (рис. 3.10). После нанесения литейно-модельных указаний в соответствии с ГОСТ 3212–92, ГОСТ 26645–85, ГОСТ 3.1125–88 и с помощью программы SolidWorks разрабатываем чертеж отливки и определяем ее массу и габаритные размеры. Масса отливки составляет 15,3 кг, а габаритные размеры модели с учетом припусков на механическую обработку и уклонов составят $320 \times 225 \times 66$ мм.

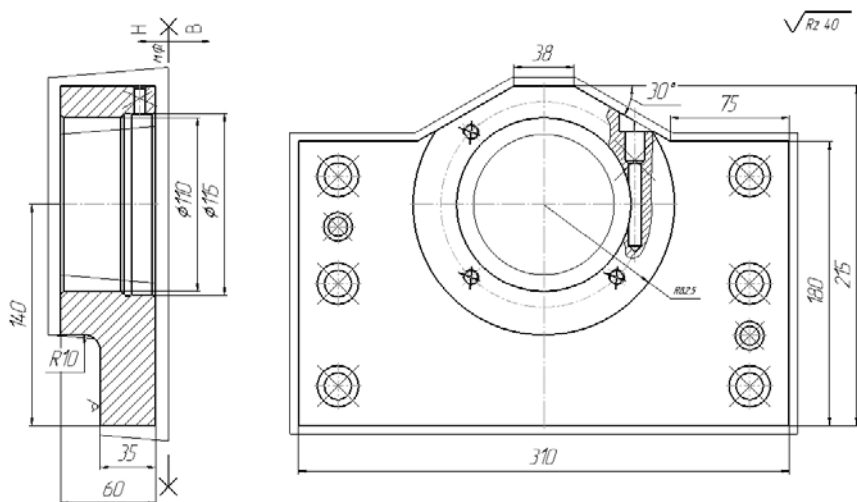


Рис. 3.10. Деталь «Крышка» с литейно-модельными указаниями

Разрабатываем эскиз расположения моделей на подмодельной плите с учетом минимально допустимых толщин формовочной смеси согласно табл. 1.1. Для отливки массой от 11 до 25 кг минимально допустимые толщины формовочной смеси будут следующие: между опокой и моделью – 40 мм, между моделями – 50 мм, между моделью и шлакоуловителем – 30 мм, от верха модели до верха опоки – 60 мм и от низа модели до низа опоки – 70 мм. Размещаем на плите две модели и определяем размеры опок. Для этого откладываем размеры минимальных толщин формовочной смеси между опокой и моделью $40 + 40 = 80$ мм, габариты моделей $320 \cdot 2 = 640$ мм, расстояние между моделями 50 мм. Длина опоки в свету должна быть не менее $80 + 640 + 50 = 770$ мм. По ширине модели располагаем в один ряд. Таким образом, минимальная ширина опоки должна быть $40 + 40 + 225 + 30 + 30 = 365$ мм, высота 136 мм. В соответствии с ГОСТ 2133–75 по табл. 1.2 и 1.3 выбираем ближайшие большие размеры стандартной опоки: ширина 400 мм, длина 800 мм, высота 150 мм. После расположения моделей разрабатываем конструкцию литниковой системы, которая будет состоять из двухстороннего дросселя, двух шлакоуловителей по бокам дросселя, четырех питателей, стояка с литниковой воронкой и определяем их размеры. Длина шлакоуловителей равна 400 мм, питателей 60 мм (рис. 3.11).

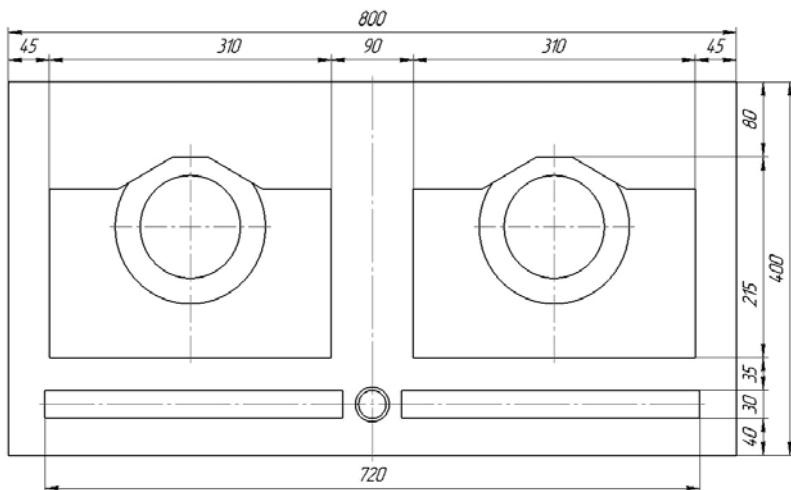


Рис. 3.11. Монтаж моделей на подмодельной плите

Расчет начинаем с определения массового расхода расплава ($m_{\tau \text{ ср.}}$) по графику, приведенному на рис. 3.7, для медленной заливки (так как деталь толстостенная), масса отливок в форме, равной 30,6 кг, $m_{\tau \text{ ср.}} = 1,6$ кг/с, а время заливки 20 с.

Определяем начальный расход ($m_{\tau \text{ нач.}}$) по графику, представленному на рис. 3.8, для этого рассчитываем отношения P/C и P/H . Поскольку вся отливка расположена в нижней полуформе, то $P = 0$, следовательно коэффициент $K = 1$ и $m_{\tau \text{ ср.}} = m_{\tau \text{ нач.}}$.

По номограмме (рис. 1.5, a , или табл. 1.1) выбираем воронку № 2 с размерами $D = h_{\text{ч}} = 60$ мм, $d_{\text{ст в}} = 23$ мм.

Определяем площадь сечения шлакоуловителя по графику, представленному на рис. 3.9, для $m_{\tau \text{ нач.}} = 1,6$ кг/с $F_{\text{шл}} = 5,2$ см². Согласно схеме монтажа моделей на плите одна ветвь шлакоуловителя питает одну отливку, поэтому площадь сечения этой ветви будет составлять половину общей площади сечения шлакоуловителя 2,6 см², размеры изображенного на схеме сечения шлакоуловителя (нижний график, рис. 3.9): нижнее основание $a = 1,70$ см, верхнее – 1,2 см, высота $h = 2,1$ см.

Суммарная площадь сечения питателей определяем по кривой I , которая соответствует схеме подвода металла к отливке (рис. 3.11). Для $m_{\tau \text{ нач.}} = 1,6$ кг/с суммарная площадь питателей $\sum F_{\text{п}} = 3,2$ см², а площадь одного питателя $F_{\text{п}} = 0,8$ см².

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛИТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ФОРМ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТЬЮ РАЗЪЕМА

Расчет вертикальных напорных литниковых систем для автоматических формовочных линий с вертикальной плоскостью разъема сводится к определению площади сечения питателя, подводных литниковых каналов и выбору номера и размеров литниковой чаши [2]. Площадь сечения питателя ($F_{\text{п}}$) находится по формуле

$$F_{\text{п}} = \frac{1036 \cdot G}{tm\sqrt{H_{\text{расч.}}}}, \quad (4.1)$$

где G – масса отливки, кг;

t – время заполнения одной полости формы расплавом, с;

m – коэффициент трения;

$H_{\text{расч.}}$ – высота ферростатического давления, мм.

Время наполнения полости формы (t) необходимо выбирать на 4 с короче цикла работы формовочной машины, чтобы не задерживать процесс формообразования. Продолжительность цикла зависит от типа машины, производительности, толщины формы и наличия стержней. Толщина формы, в свою очередь, зависит от максимальных высот моделей на плитах давления и противодействия и минимальной толщины слоя формовочной смеси между моделями, которая берется равной 70 мм (рис. 4.1) и определяется из выражения

$$h_{\text{ф}} = h_1 + h_2 + 70, \quad (4.2)$$

где h_1 – максимальная высота модели на плите давления, мм;

h_2 – максимальная высота модели на плите противодействия, мм.

Значения G , h_1 и h_2 выбираются на основании литейно-модельных указаний, нанесенных на чертеж детали.

Максимальная производительность для автоматических линий Дисаматик 2013МК5-А и 2013МК5-Б с размерами формы: шириной 600 и 650 мм, высотой 480 и 535 мм соответственно представлены в табл. 4.1, 4.2.

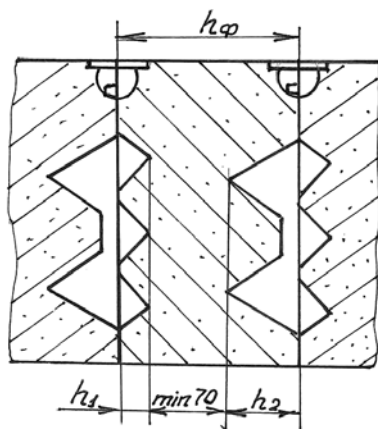


Рис. 4.1. Схема к определению толщины формы

Таблица 4.1

Максимальная производительность линии 2013МК5-А
в зависимости от толщины формы и наличия стержней

Толщина формы, мм	120	150	200	250	300	330
Производительность, форм/ч отливки без стержней	370	370	370	365	350	330
Производительность, форм/ч отливки со стержнями	355	355	355	348	333	317

Таблица 4.2

Максимальная производительность линии 2013МК5-Б
в зависимости от толщины формы и наличия стержней

Толщина формы, мм	120	150	200	250	300	350
Производительность, форм/ч отливки без стержней	350	350	350	335	323	308
Производительность, форм/ч отливки со стержнями	330	330	330	319	307	295

На основании значений максимальной производительности определяем продолжительность цикла изготовления формы на указанных выше автоматических линиях по табл. 4.3 и 4.4.

Коэффициент потерь (μ) зависит от температуры заливки, геометрии литниковой системы, газового давления в полости формы, рекомендуется выбирать при толщине питателя до 3 мм – 0,4; 4 мм – 0,5 и 5 мм – 0,6.

Таблица 4.3

Продолжительность цикла формовочной машины Дисаматик 2013МК5-А

Производительность, форм/час	220	240	260	280	300	320	340	360
Продолжительность цикла, с	16,3	15,0	13,8	12,8	12,0	11,2	10,6	10,0

Таблица 4.4

Продолжительность цикла формовочной машины Дисаматик 2013МК5-Б

Производительность, форм/час	220	240	260	280	300	320	330
Продолжительность цикла, с	16,4	15,0	13,9	13,0	12,0	11,3	10,9

Величина ферростатического давления металла в литниковой системе (H_p) зависит от расположения питателей от уровня металла в литниковой чаше. Для определения H_p составляется эскиз расположения моделей на подмодельных плитах (рис. 4.2) с учетом минимально необходимых толщин формовочной смеси в верхней, нижней и боковых кромках формы, которые выбираются в зависимости от толщины стенок отливки и тотальной высоты модели по табл. 4.5.

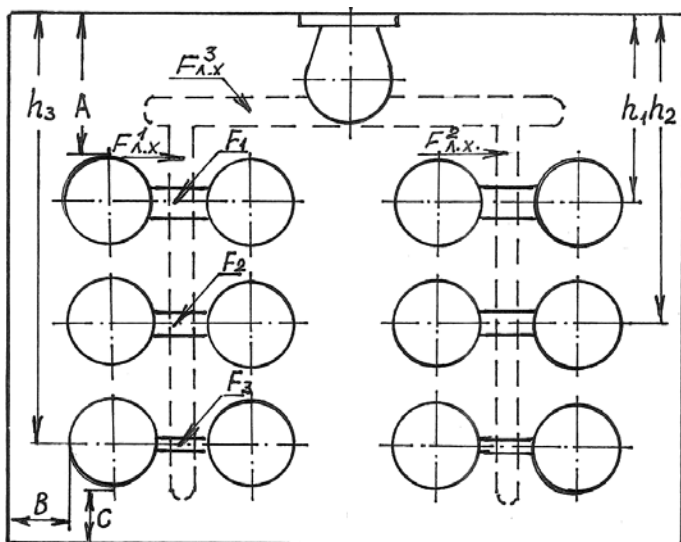


Рис. 4.2. Схема расположения моделей на подмодельной плите

Таблица 4.5

Значения минимальных толщин формовочной смеси

Толщина стенки отливки, мм	Тотальная высота модели, мм	Верхняя кромка А, мм	Боковая кромка В, мм	Нижняя кромка С, мм
0–15	0–50	70	30	30
	50–100		40	40
	100–150		50	50
	150–200		60	60
	200–250		70	70
	250–300		80	80
15–25	0–50	70	60	50
	50–100		70	60
	100–150		80	70
	150–200		90	80
	200–250		100	90
	250–300		110	100

После нахождения площадей питателей ($F_{\text{п}}$) определяются площади сечений литниковых ходов ($F_{\text{л.х.}}$):

$$F_{\text{л.х.}} = \sum F_{\text{п}} \cdot 1, 2,$$

где $\sum F_{\text{п}}$ – сумма площадей питателей, отходящих от литникового хода.

Для приведенной схемы (рис. 4.2) площадь сечения литникового хода 1

$$F_{\text{л.х.}}^1 = (2F_1 + 2F_2 + 2F_3) \cdot 1, 2.$$

Поскольку литниковый ход 1 и 2 питают одинаковое количество отливок, то их площади будут равны. Литниковые ходы 1 и 2 можно делать ступенчатыми (рис. 4.3) или коническими (рис. 4.4), постепенно уменьшая их сечение по мере снижения количества питаемых отливок. Уменьшение сечения литникового хода может осуществляться за счет изменения его высоты при одинаковом размере нижнего основания (рис. 4.3, а), или меняются размеры всех сечений с сохранением отношений нижнего, верхнего оснований и высоты (рис. 4.3, б). Такая конструкция вертикальных литниковых ходов будет позволять создавать давление в подводящем канале и сокращать время наращивания ферростатического напора путем уменьшения времени, необходимого для заполнения металлом литниковой системы. Формы и размеры стандартных литниковых ходов представлены на рис. 4.4.

Площадь сечения литникового хода 3, который подводит металл к литниковому ходу 1, определяется путем увеличения площади литникового хода 1 ($F_{\text{л.х.}}^1$) на 20 %.

$$F_{\text{л.х.}}^3 = F_{\text{л.х.}}^1 \times 1, 2.$$

Литниковый ход имеет трапециевидальное сечение с размерами: верхнее основание – a , нижнее основание – $2a$ и высота – $2a$. Размер a определяется из выражения

$$a = \sqrt{\frac{F}{3}}, \text{ мм.}$$

По эскизу (рис. 4.2) находят длину питателей, литниковых ходов и определяют массу литниковой системы

$$G_{\text{л.с.}} = G_{\text{пит}} + G_{\text{л.х.}} + G_{\text{лч}}, \quad (4.3)$$

где $G_{\text{пит}}$ – масса питателей, кг;
 $G_{\text{л.х.}}$ – масса литниковых ходов, кг;
 $G_{\text{лч}}$ – масса литниковой чаши.

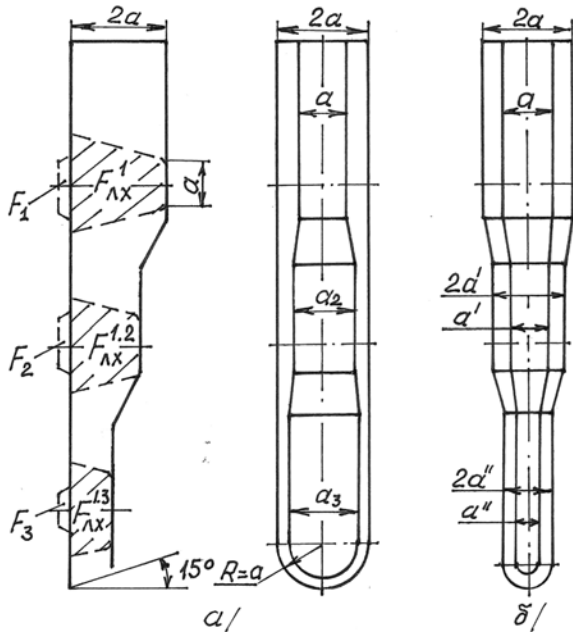
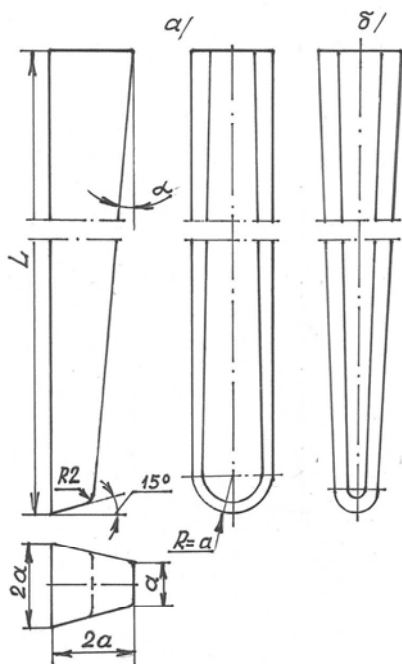


Рис. 4.3. Формы ступенчатого литникового хода:
 а – с постоянными размерами основания и переменной высотой;
 б – с постоянным отношением верхнего и нижнего основания

Масса питателей и литникового хода определяется как произведение их площади на длину и на плотность заливаемого сплава.



№	a , мм	F , мм ²
1	5	75
2	6	108
3	7	147
4	8	192
5	9	243
6	10	300
7	11	363
8	12	432
9	13	507
10	14	588
11	15	675
12	16	768
13	17	867
14	18	972
15	19	1063
16	20	1200

Рис. 4.4. Формы и размеры конического литникового хода:
 a – с постоянным размером основания;
 $б$ – с постоянным отношением верхнего и нижнего оснований

Определяется массовая скорость заливки металла в форму по формуле

$$m_{\tau} = \frac{G_{\phi}}{\tau}, \quad (4.4)$$

где G_{ϕ} – масса металла в форме.

По табл. 4.6 выбирается номер и размеры литниковой чаши. Чертеж литниковой чаши показан на рис. 4.5.

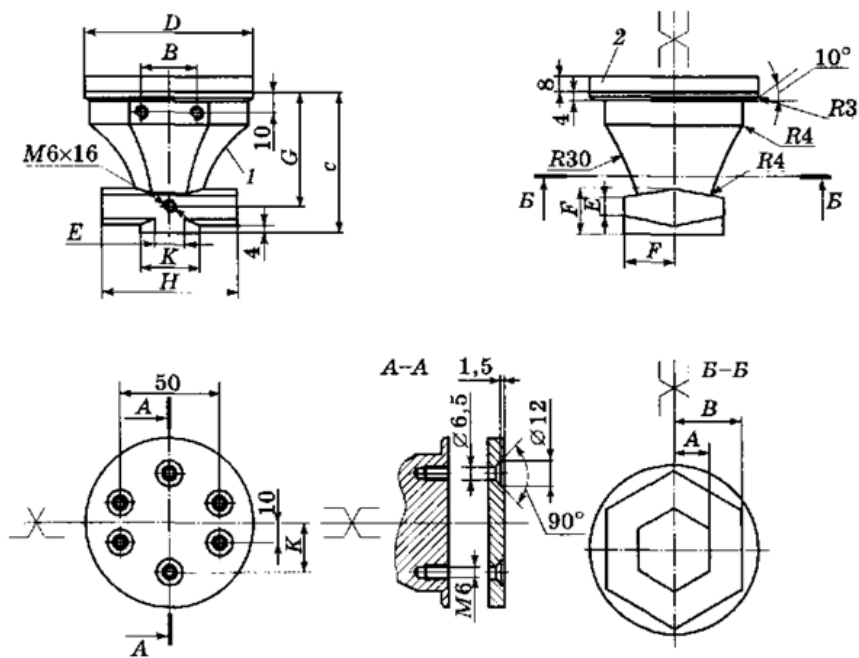


Рис. 4.5. Литниковая чаша

Таблица 4.6

Выбор литниковой чаши

Конфигурация чаш															
воронка №	размеры, мм										площадь $L, \text{мм}^2$	$M, \text{мм}^2$	скорость заливки, кг/с	масса, кг	эффективность
	A	B	C	D	E	F	G литниковых чаш	H	J	K					
1	8	33	66	86	8	16	50	58	46	25	221	92	1	1	1,0
2	11	36	72	92	10	20	54	66	53	28	419	300	2	1,6	1,3
3	14	39	78	98	12	24	58	74	60	31	678	432	3	2,0	1,5
4	17	42	84	104	14	28	62	82	67	34	1000	588	4	2,7	1,5
5	20	45	92	110	16	32	68	90	74	37	1384	768	5	3,3	1,5
6	23	48	100	116	18	36	74	98	81	40	1830	972	6	4,2	1,4
7	26	51	108	122	20	40	80	104	86	42	2163	1200	7	4,9	1,4
8	29	54	116	128	22	44	86	112	91	45	2811	1452	8	5,6	1,4
9	32	57	124	134	24	48	92	120	96	48	3422	1728	9	6,4	1,4
10	35	60	132	140	26	52	98	128	101	50	4094	2028	10	7,0	1,4

4.1. Пример расчета вертикальной литниковой системы

Рассмотрим в качестве примера расчет литниковой системы для получения отливки детали «Корпус» (рис. 4.6) на автоматической формовочной линии Дисаматик 2013МК5-А с размерами формы – ширина 600 мм, высота 480 мм. Материал детали СЧ20, масса детали – 9,7 кг.

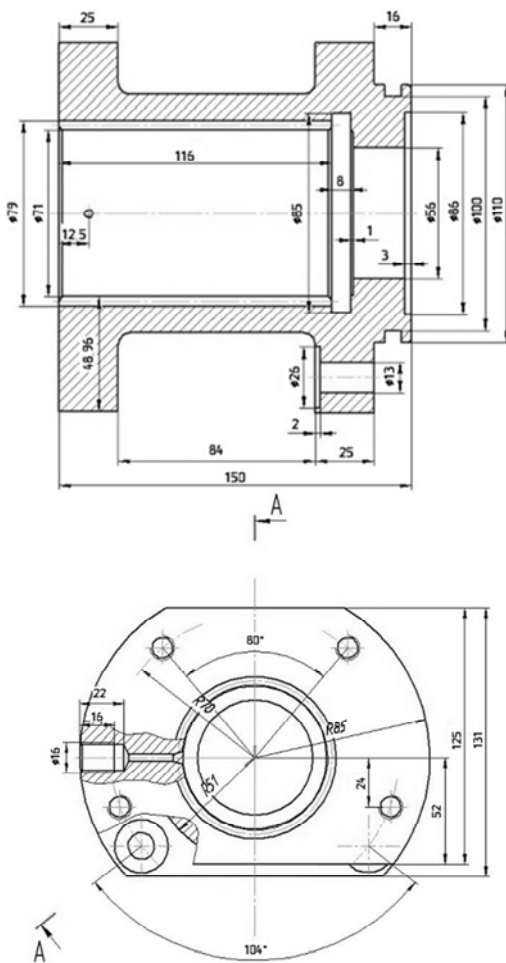


Рис. 4.6. Чертеж детали «Корпус»

Для определения массы отливки на чертеж детали наносим литейно-модельные указания (рис. 4.7), определяем массу отливки, ее габаритные размеры и высоту моделей. Масса отливки $G = 10$ кг, габаритный размер модели с учетом размеров стержневых знаков, припусков на механическую обработку и зазоров составляет 85×275 мм, высота модели плиты давления $h_1 = 74,7$ мм (рис. 4.8), плиты противодействия $h_2 = 59,7$ мм (рис. 4.9). Принимаем $h_1 = 75$ мм, $h_2 = 60$ мм.

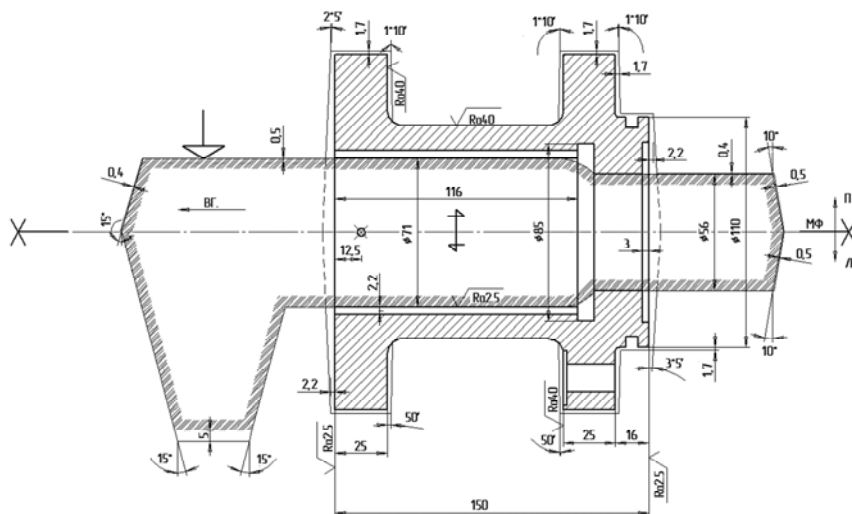


Рис. 4.7. Чертеж детали «Корпус» с литейно-модельными указаниями

По формуле (4.2) определяем толщину формы

$$h_{\text{ф}} = 75 + 60 + 70 = 205, \text{ мм.}$$

Из табл. 4.1 выбираем ближайшее большее значение толщины формы для данной автоматической линии $h_{\text{ф}} = 250$ мм. По выбранному значению $h_{\text{ф}}$ определяется максимальная производительность линии (табл. 4.2) для получения отливок со стержнями, которая при толщине формы в 250 мм составляет 348 форм в час. На основании значения максимальной производительности (табл. 4.3) определяется продолжительность цикла изготовления формы. Для выбранной производительности в 348 форм в час значение продолжительности цикла выбирается по ближайшему меньшему, так как большее зна-

чение превышает возможности линии по производительности для данной толщины формы. Принимаем продолжительность цикла 10,6 с, время заполнения полости формы расплавом (t) берется на 4 с меньше цикла и составляет 6,6 с. Для определения статического давления металла (H_p) в литниковой системе составляем эскиз расположения моделей на подмодельной плите с учетом минимальных толщин формовочной смеси по контуру формы и между моделями. Для толщины стенки отливки 25 мм и высоты модели 75 мм из табл. 4.5 определяем: $A = 70$ мм; $B = 70$ мм; $C = 60$ мм. Эти размеры откладываются от границ формы (рис. 4.8, 4.9) и определяется площадь на подмодельной плите, где должны располагаться модели.

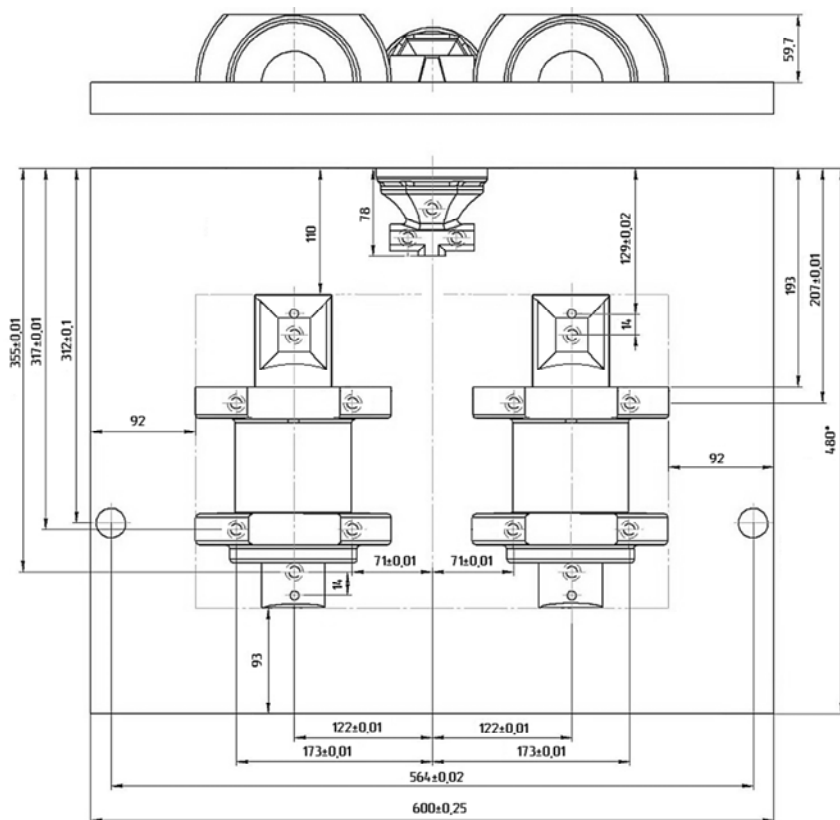


Рис. 4.8. Монтаж плиты давления

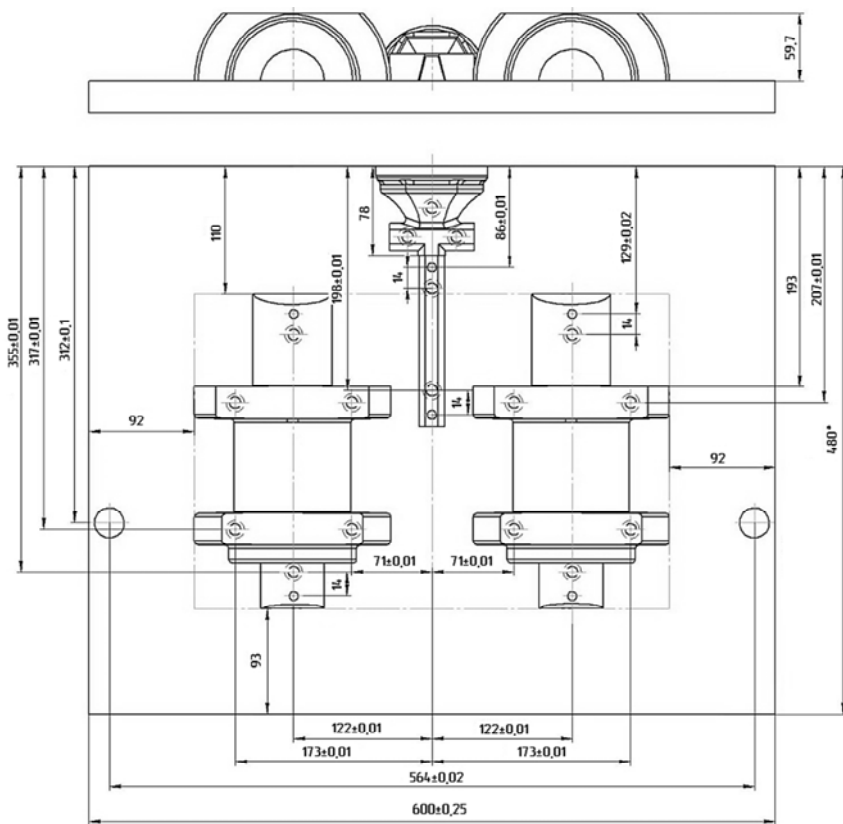


Рис. 4.9. Монтаж плиты противодействия

$$600 - (70 + 70) = 460, \text{ мм};$$

$$480 - (60 + 70) = 350, \text{ мм}.$$

Площадь сечения питателя ($F_{\text{п}}$) находится по формуле (4.1).

Подставляем полученные значения $G = 10$ кг; $m = 0,5$; $t = 6,6$ с; $H_{\text{p}} = 195$ мм в формулу, получим

$$F_{\text{п}} = \frac{1036 \cdot 10}{6,6 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{195}} = 224,88, \text{ мм}^2.$$

Принимаем $F_{\text{п}} = 225 \text{ мм}^2$.

Площадь сечения подводных литниковых каналов определяется суммой площадей сечений питателей, работающих от литникового канала с увеличением площади на 20 %, чтобы создать в литниковой системе избыточное давление.

$$F_{\text{л.х.}} = 2F_{\text{п}} \cdot 1,2 = 225 \cdot 2 \cdot 1,2 = 540, \text{ мм}^2.$$

Так как ближайшее значение площади поперечного сечения литникового хода $F_{\text{л.х.}} = 588 \text{ мм}^2$, то принимаем из рис. 4.4 литниковый ход № 10 ($a = 14 \text{ мм}$).

Стандартные размеры чаш классифицируются в соответствии с расходом жидкого расплава в кг/с, который они могут обеспечить. Для определения нужного размера чаши, полную массу расплава ($G_{\text{ф}}$), заливаемого в форму, необходимо разделить на полное время заливки (t).

Полная масса расплава в форме ($G_{\text{ф}}$) определяется как сумма масс отливок плюс масса литниковой системы, определяемой по формуле (4.3):

$$G_{\text{пит}} = F_{\text{п}} \cdot l_{\text{п}} \cdot \rho = 0,000225 \cdot 0,06 \cdot 7100 = 0,0958, \text{ кг};$$

$$G_{\text{л.х.}} = F_{\text{л.х.}} \cdot l_{\text{л.х.}} \cdot \rho = 0,000540 \cdot (0,210 \cdot 0,078) \cdot 7100 = 0,506, \text{ кг}.$$

Полная масса расплава в форме, без учета литниковой чаши составляет

$$G_{\text{питф}} = 2 \cdot 20 + 0,0958 + 0,506 = 40,6, \text{ кг}.$$

Определяем массовую скорость заливки по формуле (4.4):

$$m_{\tau} = \frac{40,6}{6,6} = 6,15, \text{ кг/с}.$$

Выбираем по табл. 4.6 чашу № 7, масса которой равна 4,9 кг. С учетом массы литниковой чаши уточняем массовую скорость заливки

$$m'_{\tau} = \frac{40,6 + 4,9}{6,6} = 6,8, \text{ кг/с}.$$

Уточненной массовой скорости заливки соответствует чаша № 7.

На основании полученных результатов расчета литниково-питающей системы, определения припусков на механическую обработку и других литейно-модельных указаний, а также исходя из выбранной технологии изготовления отливки «Корпус» с использованием пакета SolidWorks, были построены 3D-модели отливок с литниково-питающей системой (рис. 4.10) и формы в сборе (рис. 4.11), которые необходимы для выполнения моделирования литейных процессов.

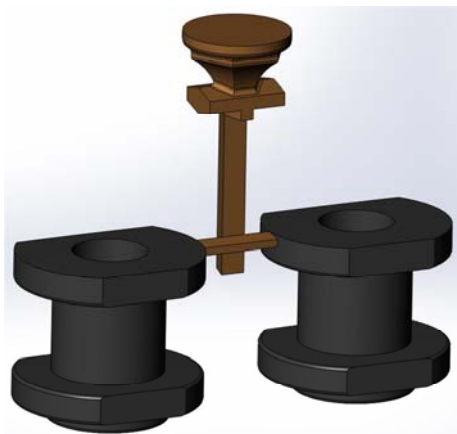


Рис. 4.10. Отливки «Корпус» с литниково-питающей системой

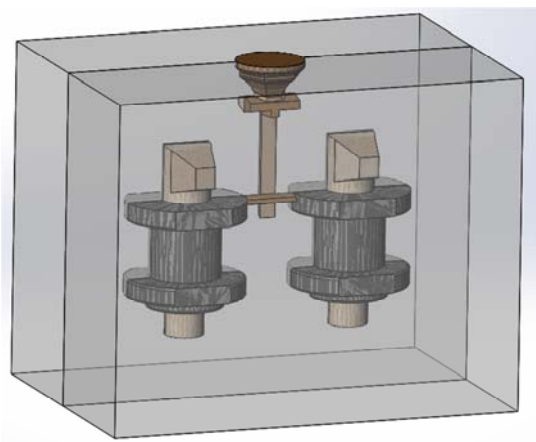


Рис. 4.11. Форма в сборе

4.2. Моделирование литейных процессов

Моделирование литейных процессов проводили с использованием пакетов СКМ «Полигон», ESI ProCast, LVMFlow. Эти программные пакеты позволяют моделировать следующие процессы: тепловые процессы при затвердевании, образование усадочных раковин и макропористости, образование микропористости, гидродинамические процессы при заливке, кроме того, формирование и расчет любых «критериев качества» для прогноза структуры, пригара, разрыва формы, механических свойств, напряжений, трещин и др. Базовые модели (затвердевание, усадка и др.), опираясь на реальную физику процессов, максимально универсальны по сплавам и способам литья. Сплавы: алюминиевые, магниевые, медные, чугуны, стали, никелевые и др. Способы: в разовые литейные формы, в кокиль (в том числе водоохлаждаемый), ЛВМ, ВПФ, ЛПД, ЛНД, жидкая штамповка, направленное затвердевание и др. В программных пакетах СКМ «Полигон», ESI ProCast используется метод конечных элементов, а в LVMFlow используется метод конечных объемов.

Для генерации конечно-элементарной сетки в программе ProCast, используем файл отливки, сохраненный в SolidWorks с расширением Parasolid (.x_t, .iges, .step). Разбиваем на конечно-элементарные сетки в системе Visual-Mesh. Задаем значение размеров тетраэдров 8 мм (рис. 4.12), затем строим форму и разбиваем ее на сетку размером тетраэдров 8 мм (рис. 4.13). После получения удовлетворительного результата генерации сетки, модель отливки и формы готовы для ввода исходных данных и запуска моделирования процессов литья. Файл с расширением «.mesh» используем для моделирования в ProCast и переименовываем на файл с расширением «.pro», для дальнейшей работы в программе Poligon. При моделировании в программе LVMFlow используем встроенный генератор сетки. Параметры конечно-элементарной сетки приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Параметры конечно-элементарной сетки

Количество элементов	Количество узлов	Размеры тетраэдров
479783	92612	8 мм

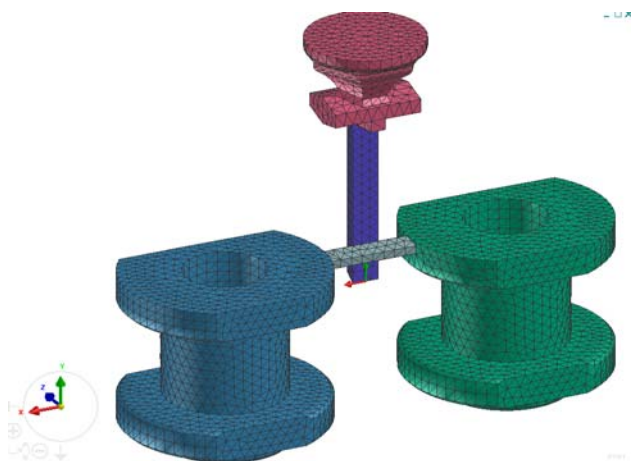


Рис. 4.12. Процесс генерации конечно-элементной сетки отливки «Корпус» с ЛПС (в программе Visual-Mesh)

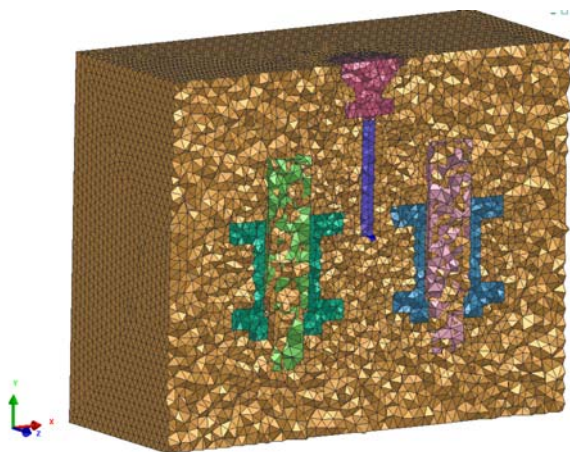


Рис. 4.13. Процесс генерации конечно-элементной сетки формы (в программе Visual-Mesh)

В трех программных пакетах задавались идентичные начальные и граничные условия. Начальные и граничные условия, использованные при моделировании литейных процессов технологии изготовления отливки «Корпус», приведены в табл. 4.8, 4.9, 4.10.

Таблица 4.8

Теплофизические свойства литейной формы

Материал литейной формы	Теплоемкость, КДж/м ³ ·К	Теплопроводность, Вт/м·К
Песчано-глинистая смесь с влажностью 3,5%	1400,0–1400,360	0,6–1,5

Таблица 4.9

Теплофизические свойства СЧ20

Плотность	Удельная теплоемкость, КДж/кг·К	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплота затвердевания	T _{лик} , °С	T _{сол} , °С
7100	480	54	238000	1180	1080

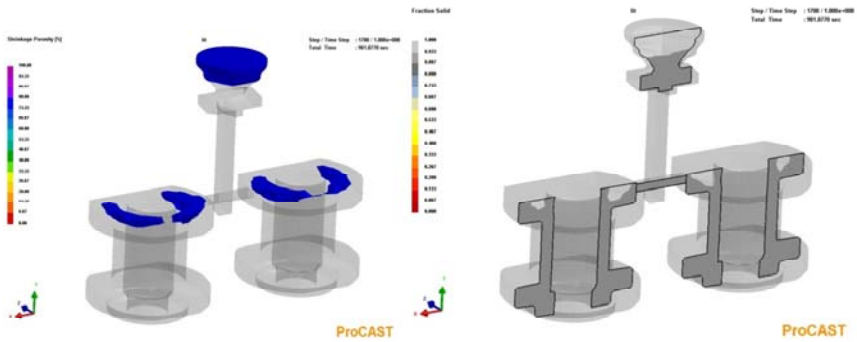
Таблица 4.10

Начальные условия

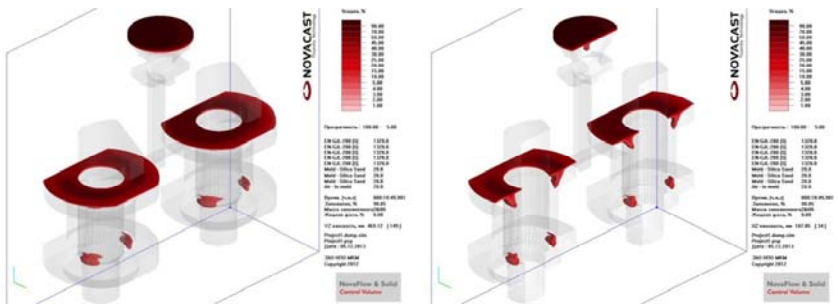
Температура заливки, °С	Температура литейной формы, °С	Линейная скорость заливки, м/с	Коэффициент температуропроводности через границу контакта отливка/форма, Вт/м ² ·К
1320	20	0,0594	500

При расчете процессов затвердевания использованы данные о распределении температуры в литейной форме и отливках, полученные при моделировании процесса заполнения. Результаты моделирования приведены на рис. 4.14.

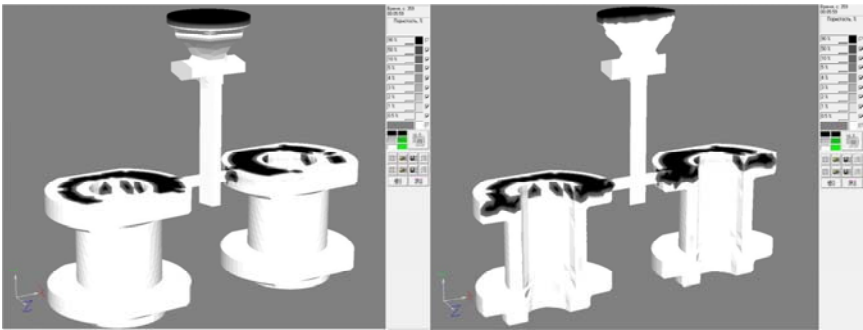
В результате моделирования установлено, что время затвердевания до температуры $T_{\text{сол}}$ составляет 700 с. Анализ усадочных дефектов в трех программных пакетах показал (рис. 4.14), что усадочные раковины образуются в теле отливки, глубина усадки 20 мм, а вероятность образования более 90 %.



a



б



в

Рис. 4.14. Результаты моделирования в трех программных пакетах:
a – ProCast; *б* – LVMFlow; *в* – Poligon

Таким образом, разработанная на первом этапе конструкция литниковой системы не позволяет изготавливать годные отливки «Корпус». Для устранения выявленных недостатков необходимо предусмотреть в конструкции ЛПС установку питающих бобышек. Для этого с учетом объема образующейся усадочной раковины и необходимого объема питаемого узла, выполняем расчет их геометрических размеров (определяем форму и объем питающей бобышки), обеспечивающих изготовление бездефектной отливки «Корпус».

После расчета питающих бобышек выполняем повторный расчет ЛПС. Расчет начинаем с узла питания и прибыли отливки.

Расчет модуля отливки M_C выполняем по формуле

$$M_C = \frac{V_C}{A_C},$$

где M_C – модуль отливки, см;

V_C – объем отливки, см³;

A_C – площадь поверхности отливки, см².

$$M_C = \frac{V_C}{A_C} = 0,95 \text{ см.}$$

Объем и площадь поверхности отливки определили с использованием программы SolidWorks.

Модуль питателя отливки, который зависит от коэффициента критерия модуля K_M , определяем по формуле (6.7):

$$M_F \geq K_M \cdot M_C,$$

где M_F – модуль питателя, см;

M_C – модуль отливки, см;

K_M – коэффициент критерия модуля.

Для серого чугуна K_M составляет 0,6–1,0 (принимая значение 1,0), тогда $M_F \geq 1,0 \cdot 0,95 = 0,95$.

Из табл. 6.6 стандартных форм и размеров прибылей в зависимости от рассчитанного модуля питателя ($M_F = 0,95$ см) определяем размеры цилиндрической прибыли, которые соответствуют прибыли № 8.

Диаметр прибыли (D_R) равен 55 мм.

Площадь сечения шейки прибыли вычисляется следующим образом:

– диаметр шейки прибыли:

$$D_N \geq \frac{D_R}{3} = \frac{55}{3} = 18,3, \text{ мм};$$

– площадь круглого сечения шейки

$$A_N = \frac{\pi \cdot D_N^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 18,3^2}{4} = 262,88, \text{ мм}^2.$$

Выбираем форму шейки трапецеидальную и определяем ее размеры из выражения

$$a = \sqrt{\frac{262,88}{3}} = 9,36, \text{ мм}.$$

Меньшее основание трапеции a равно 9,4 мм, большее – 18,8 мм, высота – 18,8 мм.

В связи с горизонтальным расположением отливки в литейной форме и боковым расположением прибыли, для обеспечения лучшего питания отливки необходимо применить напорный тип литниковой системы (рис. 4.15, 4.16).

Использование в литниковой системе питающих бобышек увеличивает металлоемкость формы на величину массы прибылей, что требует уточнения номера литниковой чаши.

Массу питающих прибылей определяем из выражения

$$G_{\text{пр}} = \frac{\pi D^2 R}{4} H \cdot \rho,$$

где H – высота прибыли, равная $1,5 D_R$;

$$H = 1,5 \cdot 55 = 82,5, \text{ мм}.$$

$$G_{\text{пр}} = \frac{3,14 \cdot 0,055}{4} \cdot 0,082 \cdot 7100 = 1,38, \text{ кг}.$$

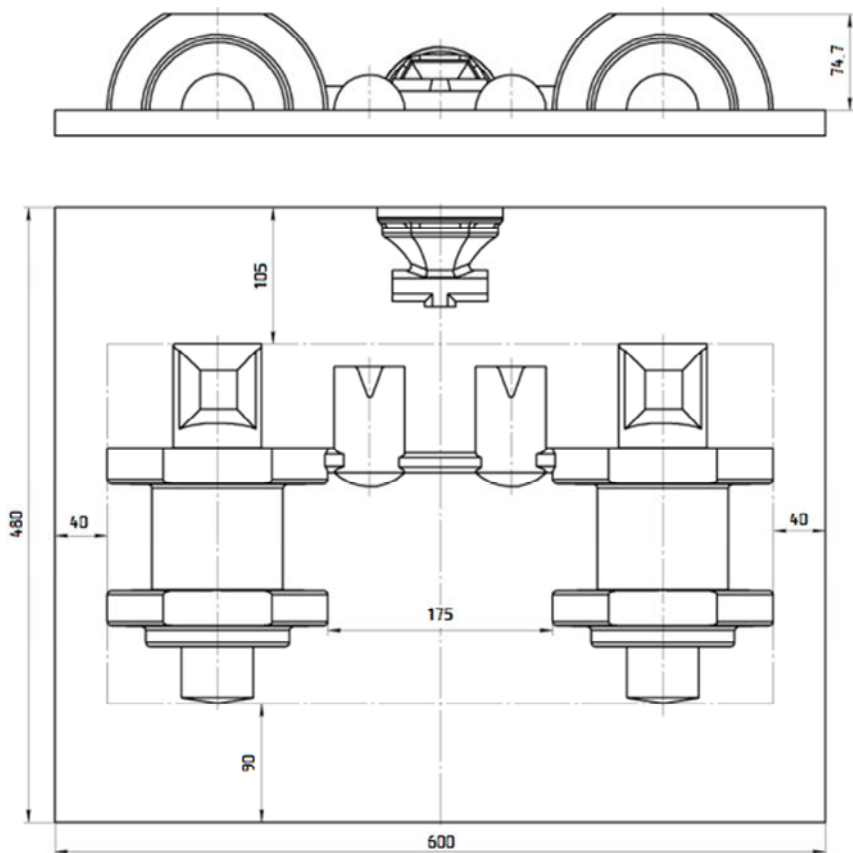


Рис. 4.15. Монтаж моделей на плите давления

Таким образом, полная масса металла в форме

$$G_{\phi} = 40,6 + 2 \cdot 1,38 + 4,9 = 48,26, \text{ кг.}$$

С учетом прибылей уточняем массовую скорость заливки

$$m''_{\tau} = \frac{48,26}{6,6} = 7,3, \text{ кг/с.}$$

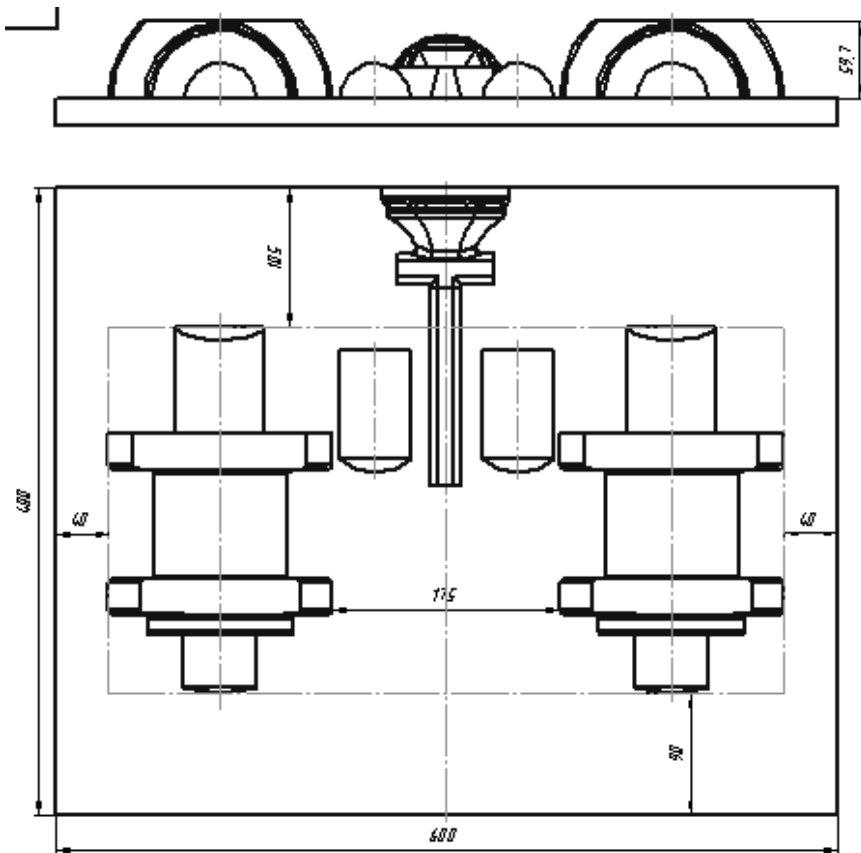


Рис. 4.16. Схема расположения моделей на плите противодействия

Выбираем чашу № 8.

На основании полученных результатов повторного расчета литниково-питающей системы с использованием пакета SolidWorks строим 3D-модели отливок с литниково-питающей системой (рис. 4.17) и формы в сборе (рис. 4.18), которые необходимы для выполнения моделирования литейных процессов.

Начальные и граничные условия, использованные при моделировании литейных процессов технологии изготовления отливки «Корпус», приведены в табл. 4.11, 4.12, 4.13.

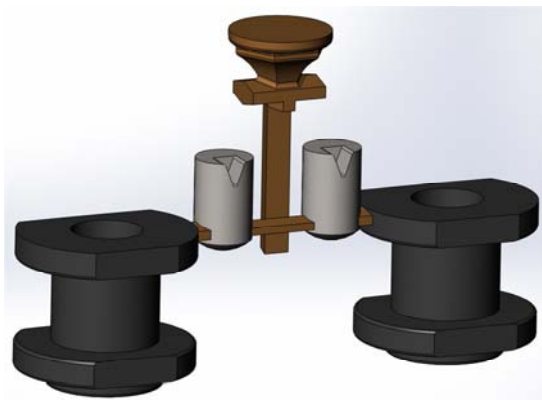


Рис. 4.17. Отливки «Корпус» с литниково-питающей системой

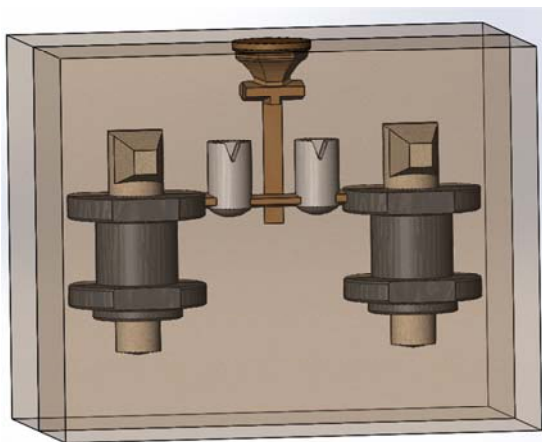


Рис. 4.18. Форма в сборе

Таблица 4.11

Теплофизические свойства литейной формы

Материал литейной формы	Теплоемкость, КДж/м ³ ·К	Теплопроводность, Вт/м·К
Песчано-глинистая смесь с влажностью 3,5%	1400,0–1400,360	0,6–1,5

Таблица 4.12

Теплофизические свойства СЧ20

Плотность	Удельная теплоемкость, КДж/кг·К	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплота затвердевания	$T_{лик}$, °С	$T_{сол}$, °С
7100	480	54	238000	1180	1080

Таблица 4.13

Начальные условия

Температура заливки, °С	Температура литейной формы, °С	Линейная скорость заливки, м/с	Коэффициент теплопроводности через границу контакта отливка/форма, Вт/м ² ·К
1320	20	0,0623	500

Генерацию на конечно-элементарной сетке осуществляем в системе Visual-Mesh. Задаем значение размеров тетраэдров 8 мм (рис. 4.19), затем строим форму и генерируем сетку размером тетраэдров 10 мм (рис. 4.20). Файл с расширением «.mesh» используем для моделирования в ProCast и переименовываем на файл с расширением «.pro», для дальнейшей работы в программе Poligon. При моделировании в LVMFlow используем встроенный генератор сетки. Параметры конечно-элементарной сетки приведены в табл. 4.14.

Таблица 4.14

Параметры конечно-элементарной сетки

Количество элементов	Количества узлов	Размеры тетраэдров
320121	63190	8–10 мм

При расчете процессов затвердевания использованы данные о распределении температуры в литейной форме и отливках, полученные при моделировании процессов гидродинамики заполнения формы. Результаты моделирования приведены на рис. 4.21.

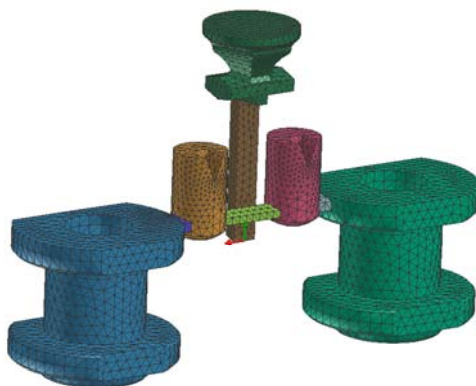


Рис. 4.19. Результаты генерации конечно-элементной сетки отливок с ЛПС (в программе Visual-Mesh)

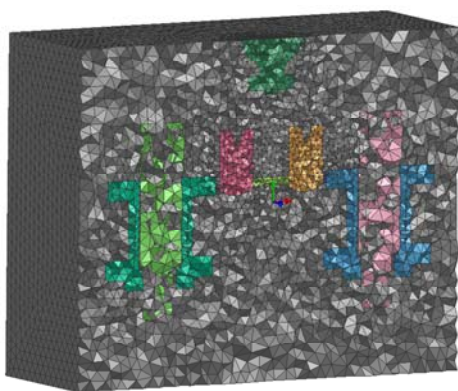
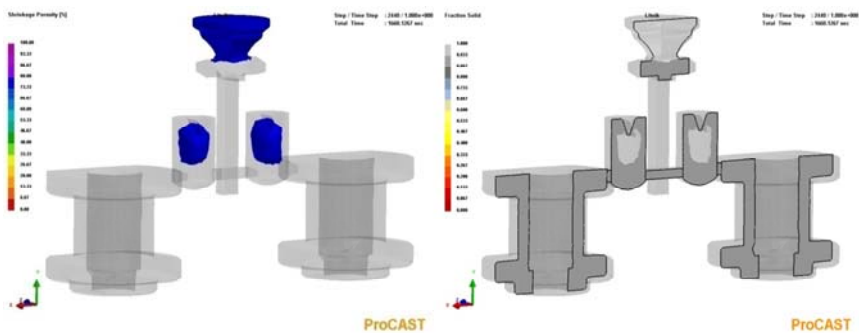
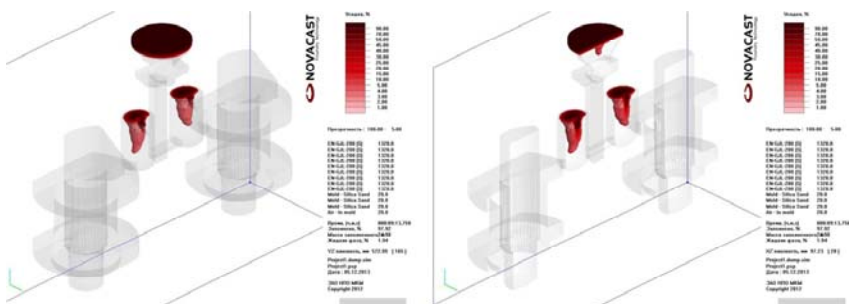


Рис. 4.20. Результаты генерации конечно-элементной сетки формы (в программе Visual-Mesh)

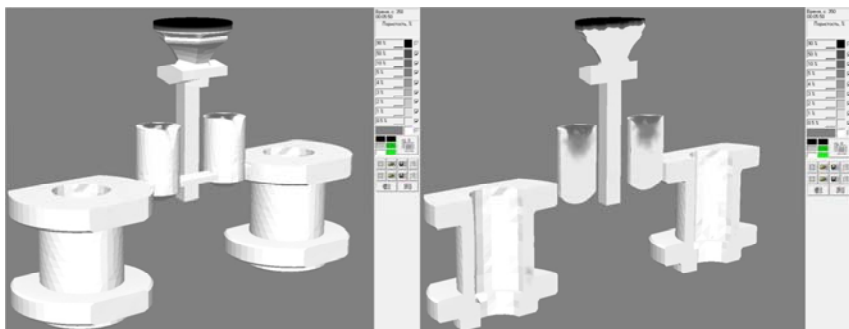
В результате моделирования установлено, что время затвердевания до температуры $T_{\text{сол}}$ составляет 730 с. Анализ показывает, что в последнюю очередь расплав затвердевает в прибылях. Это говорит о высокой эффективности рассчитанных прибылей, которые полностью выполняют функцию питания отливки расплавом. Анализ усадочных дефектов показал (рис. 4.19), что усадочные раковины образуются в прибылях, глубина усадки составляет 40 мм, а вероятность образования более 90 %.



a



б



в

Рис. 4.21. Результаты моделирования в трех программных пакетах:
 а – ProCast; б – LVMFlow; в – Poligon

5. РАСЧЕТ ГРУЗА

Для предупреждения подъема верхней полуформы при заливке и ухода металла из полости формы по плоскости разъема, производят скрепление полуформ с помощью грузов, болтов, скоб, штырей с клиньями и струбцин. Расчет массы груза для форм без стержней производят по формуле

$$P \geq k[H(F_{\text{отл}} + F_{\text{л.с.}})\rho_{\text{м}} - G_{\text{в.ф.}}], \text{ кг},$$

где P – давление расплава на верхнюю полуформу, кг;

k – коэффициент запаса, учитывающий гидравлический удар, $k = 2-4$, большее значение берется при больших скоростях заливки крупных отливок, а меньшее – при малых скоростях и мелких отливках;

H – высота верхней полуформы, м;

$F_{\text{отл.}}$ – горизонтальная проекция отливки в плоскости разъема, м²;

$F_{\text{л.с.}}$ – горизонтальная площадь проекции литниковой системы в плоскости разъема, м²;

$\rho_{\text{м}}$ – плотность расплава, кг/м³;

$G_{\text{в.ф.}}$ – масса верхней полуформы, кг.

Наличие в плоскости формы стержней увеличивает давление на верхнюю полуформу за счет стремления менее плотного стержня всплыть в более плотной среде расплава.

При наличии в форме стержней расчет груза производят по формуле

$$P \geq k[H(F_{\text{отл}} + F_{\text{л.с.}})\rho_{\text{м}} + (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{ст}})V_{\text{ст}} - G_{\text{в.ф.}}], \text{ кг},$$

где $\rho_{\text{ст}}$ – плотность стержня, кг/м³;

$V_{\text{ст}}$ – объем стержня без знаковых частей, м³.

6. ВЫБОР ТИПА И КОНСТРУКЦИИ ПРИБЫЛЕЙ

Прибыль – это полость формы, наполненная расплавленным металлом и соединенная с отливкой таким образом, что она может питать жидким металлом отливку при ее усадке во время затвердевания.

Прибыль должна питать ту часть отливки, которая затвердевает последней, и поэтому ее располагают как можно ближе к этой части. Объем прибыли должен быть достаточным, чтобы содержать необходимое количество металла для компенсации усадки отливки. Форма прибыли должна обеспечивать бесперебойную подачу расплавленного металла в охлаждающую отливку.

Конструкция элемента соединения прибыли с питаемым узлом должна гарантировать, что соединение будет открытым до полного затвердевания отливки.

На отливках, как правило, устанавливают прибыли прямого действия. При этом предпочтительнее закрытые прибыли, работающие под атмосферным давлением. Прибыли прямого действия при прочих равных условиях питают отливку под большим металлостатическим напором. Закрытые прибыли более технологичны при формовке и имеют меньшие потери тепла через верхнюю поверхность, чем открытые. Такие прибыли всегда заполнены жидким металлом одинаково, независимо от условий заливки. Использование атмосферного давления в работе прибыли является наиболее дешевым и эффективным способом увеличения движущей силы питания.

Открытые прибыли необходимо применять при изготовлении крупных отливок, когда предусматривается доливка жидкого металла в прибыль после заполнения формы или засыпка поверхности расплава в прибыль экзотермическими смесями. Кроме того, такие прибыли используют при недостаточной высоте опоки.

Отводные прибыли, которые сочленяются с тепловыми узлами отливок через горизонтальные или наклонные шейки, следует применять в случае, если установка верхних прибылей прямого действия на питаемых частях отливок невозможна. Они предпочтительнее в качестве групповых, когда одна отводная прибыль обеспечивает питание нескольких отливок или тепловых центров.

Прибыли, работающие под газовым давлением, которое обеспечивается специальным патроном, применяют при изготовлении мелких и средних отливок, подвергаемых гидравлическим испыта-

ниям. Их также используют при необходимости питания отливок со стенками большой протяженности, поскольку обеспечивают увеличение дистанции действия прибыли в 1,5 раза.

Закрытые прибыли, работающие под воздушным давлением, которое осуществляется с помощью передачи его через керамическую вставку от компрессора, применяются при изготовлении крупных ответственных отливок. Действие избыточного воздушного давления увеличивает радиус действия прибыли в два раза и позволяет получать отливки с минимальной пористостью.

Легкоотделяемые прибыли применяют при изготовлении отливок из высоколегированных сталей, плохо поддающихся огневой резке. Их также применяют при вынужденной установке прибылей на необрабатываемых поверхностях отливок.

Обогреваемые и теплоизолированные прибыли рекомендуется применять при большом расходе металла на питание отливок и обусловленном этим низким выходе годного литья. Их применение экономически выгодно при производстве отливок из легированных сталей. За счет использования вкладышей из экзотермических смесей удастся снизить расход металла на прибыли в 2–4 раза и увеличить выход годного при стальном литье с 50–65 до 75–85 %. Прибыли диаметром до 400 мм рациональнее выполнять обогреваемыми, а для больших размеров – теплоизолированными.

Самой выгодной формой прибыли является цилиндрическая. Поэтому такие прибыли используют чаще всего, устанавливая на отливках типа шара, цилиндра (расположенного вертикально), плиты (расположенной горизонтально), колеса, диска и т. п. При этом открытые прибыли выполняют с сужением профиля к поверхности отливки, а закрытые имеют обратную конусность.

Широкое применение получили также призматические прибыли. Прибыли в виде плоской призмы устанавливают на отливки типа плиты (расположенной вертикально), бруса. Прибыли в виде квадратной призмы размещают на отливках, имеющих конфигурацию куба. Прибыли в виде овальной призмы выполняют на отливках типа плиты (расположенной горизонтально) и бруса. Прибыли в виде чечевицеобразной или кольцевой призмы устанавливают соответственно на отливках типа колес или полых цилиндров (расположенных вертикально). Закрытые прибыли, как правило, выполняют не с плоской, а с закругленной верхней поверхностью.

Прибыли, по возможности, устанавливаются на верхних поверхностях отливок, подвергающихся дальнейшей механической обработке.

При наличии у отливок явных тепловых узлов последние и служат местами установки прибылей. Причем количество устанавливаемых прибылей совпадает с количеством тепловых узлов. Число их может быть сокращено за счет применения холодильников.

Отливки типа плит, брусьев, колес и втулок не имеют явных тепловых центров, поэтому количество прибылей определяют, исходя из минимально необходимого их количества с учетом зоны действия прибыли, влияния на нее торцевого эффекта, холодильника.

В табл. 6.1 приведены расчетные формулы для определения радиуса действия прибыли ($r_{пр}$) и длины торцевой зоны ($L_{пр}$).

Для примера определим количество прибылей, необходимых для обеспечения качественного питания стальной отливки «шайба» (рис. 6.1) с наружным и внутренним диаметрами соответственно 1000 и 600 мм и высотой 150 мм.

Если развернуть шайбу, то получим брус сечением 200×150 мм. Поэтому зону действия прибыли находим, как для бруса (табл. 6.1) $2r_{пр} = (2 - 2,8)\delta_0$.

$$2r_{пр} = 2,4 \cdot 150 = 360, \text{ мм.}$$

Периметр по оси шайбы составляет

$$P = \pi \cdot 2r_0 = 3,14 \cdot (1000 + 600) / 2 = 2512, \text{ мм.}$$

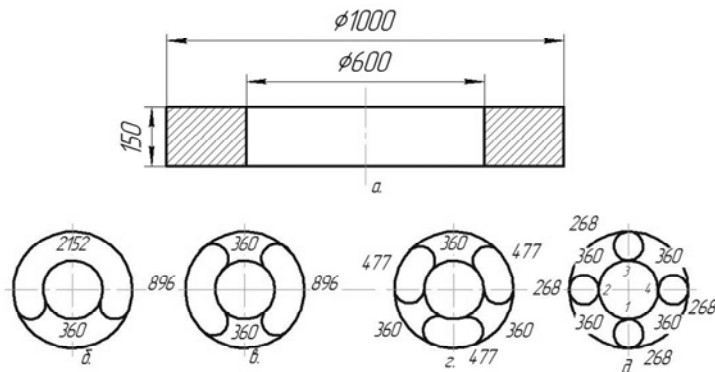
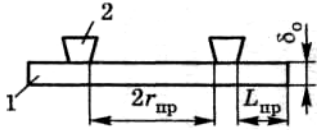
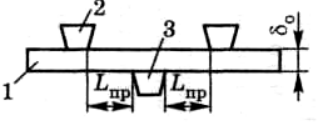
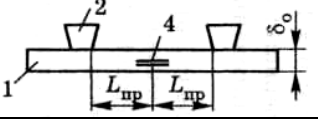


Рис. 6.1. Отливка «шайба»

Расчетные формулы для определения $L_{пр}$ и $r_{пр}$

Схема расположения прибылей	Углеродистые сплавы	Алюминиевые сплавы	Латуни	Алюминиевые бронзы
	Отливка типа плита			
	$L_{пр} = (4,5 - 6,5)\delta_0$ $2r_{пр} = (4 - 6)\delta_0$	$L_{пр} = (5,5 - 6,5)\delta_0$ $2r_{пр} = (5 - 6)\delta_0$		$L_{пр} \leq 4\delta_0$
	Отливка типа брус			
	$L_{пр} = (40 - 44)\sqrt{D}$ $2r_{пр} = (2 - 2,8)\delta_0$	$L_{пр} \leq 6,8\delta_0$	$L_{пр} \leq 1,8D$	
	Отливка типа плита			
	$L_{пр} = (3,0 - 5,0)\delta_0$			
	Отливка типа брус			
	$L_{пр} = (40 - 44)\sqrt{\delta_0}$			
	Отливка типа плита			
	$L_{пр} = (4,0 - 6,5)\delta_0$			
1 – отливка; 2 – прибыль; 3 – наружный холодильник; 4 – внутренний холодильник				

Прибыль на отливке устанавливаем на верхней ее торцевой поверхности. Рекомендуемая форма прибыли для отливок типа бруса – призма. При этом в соответствии с геометрией отливки прибыль должна иметь чечевицеобразное сечение.

Каждая такая прибыль имеет с обеих торцевых поверхностей зону питания с протяженностью, равной двум дистанциям действия, то есть 360 мм (рис. 6.1, б). Если на отливку установить одну прибыль (рис. 6.1, б) то длина ее, чтобы обеспечить достаточные условия питания, должна составить $L = 2512 - 360 = 2152$, мм. Длина прибыли получилась сопоставимой с периметром отливки. Хотя отливка при этом не будет иметь усадочных дефектов, прибыль является крайне неэкономичной. При установке двух прибылей (рис. 6.1, в) протяженность зоны питания увеличится вдвое и длина прибыли должна составить не менее $L = (2512 - 2 \cdot 360)/2 = 896$, мм. Такая прибыль также неэкономична, так как длина ее все еще намного превышает толщину отливки.

Если на отливке установить три прибыли, то минимальная длина каждой из них $L = (2512 - 3 \cdot 360)/3 = 477$, мм, что превышает толщину отливки более, чем в два раза. При установке четырех прибылей $L = (2512 - 4 \cdot 360)/4 = 268$, мм. Это сопоставимо с толщиной отливки. Поэтому решение об установке на отливке четырех прибылей является наиболее оптимальным, поскольку общая протяженность прибылей составляет 1052 мм, что в два раза меньше, чем при установке одной прибыли – 2152 мм. В соответствии с этим вся отливка делится на четыре одинаковые зоны питания по количеству прибылей. В общем случае зоны питания могут быть неодинаковыми, следовательно, и размеры прибылей будут разными. Минимально необходимый объем прибыли и конкретные размеры отдельной прибыли определяются уже с учетом ее зоны питания.

Для определения объема прибылей и ее размеров можно использовать метод Пржибыла, который дает надежные результаты.

В основу метода положено задаваемое по данным практического опыта отношение объема прибыли ($V_{пр}$) к объему возникающей в ней усадочной раковины (V_p):

$$\beta = \frac{V_{пр}}{V_p}. \quad (6.1)$$

Пренебрегая массопереносом из прибыли в отливку, имеем:

$$V_P = \varepsilon'_V (V_0 + V_{\text{пр}}), \quad (6.2)$$

где V_0 – объем питаемого узла;

ε'_V – часть объемной усадки сплава, принимающая участие в формировании усадочной раковины.

Сопоставляя уравнения (6.1) и (6.2), получим:

$$V_{\text{пр}} = \frac{\beta \varepsilon'_V}{1 - \beta \varepsilon'_V} V_0. \quad (6.3)$$

Порядок расчета размеров прибыли следующий:

1. Выделить в отливке узлы питания и рассчитать объем каждого из них (V_0).

2. Определить величину ε'_V . Для отливок из углеродистой стали и высокопрочного чугуна $\varepsilon'_V = 0,035-0,045$, для отливок из легированных сталей $\varepsilon'_V = 0,05$, для отливок из алюминиевых сплавов $\varepsilon'_V = 0,045-0,05$, для отливок из латуни $\varepsilon'_V = 0,065-0,075$ и для бронзы $\varepsilon'_V = 0,08-0,09$.

3. Выбрать тип и конфигурацию прибыли, на основании чего подобрать коэффициент β . При изготовлении отливок из стали и ВЧ рекомендуется принимать: $\beta = 11-12$ – для прибылей с рабочим давлением ниже атмосферного; $\beta = 9-10$ – с атмосферным давлением; $\beta = 8-9$ – для изолированных прибылей и $\beta = 6-7$ – для обогреваемых β прибылей; $\beta = 3-4$ – для экзотермических прибылей.

4. По формуле (6.3) определить объем прибыли ($V_{\text{пр}}$).

5. По $V_{\text{пр}}$ на основании табл. 6.2 рассчитать высоту и диаметр прибыли.

При этом $H_{\text{пр}}$ должно удовлетворять следующим условиям:

а) для открытых прибылей

$$\frac{H_{\text{пр}}}{D_{\text{пр}}} \approx 1,7-2,0; \quad (6.4)$$

б) для закрытых прибылей, устанавливаемых на отливках из стали и высокопрочного чугуна, и для отливок из цветных сплавов

$$\frac{H_{\text{пр}}}{D_{\text{пр}}} \approx 1,25-1,5. \quad (6.5)$$

Размеры прямых питающих выпоров (рис. 6.2) для чугунных отливок зависят от толщины тела отливки в месте сопряжения с выпором и определяются по табл. 6.3.

Таблица 6.2

Расчетные формулы для определения размеров основных видов прибылей

Вид прибыли	Расчетная формула	Вид прибыли	Расчетная формула
Шаровая	$D = 1,24\sqrt[3]{V_{\text{пр}}}$	Закрытая куполообразная прибыль с компактной формой горизонтального сечения	$H_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}} - 0,45\pi R^2 b}{F}$, где $H_{\text{пр}} + R$ не менее высоты питаемого узла
Закрытая куполообразная цилиндрическая	$H_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{\pi R^2} - \frac{2}{3}R$, где $H_{\text{пр}} + R$ не менее высоты питаемого узла	Открытая коническая прибыль с компактной формой горизонтального сечения	$H_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{0,95F}$
Открытая цилиндрическая или коническая прибыль	$H_{\text{пр}} = \frac{4V_{\text{пр}}}{\pi D^2}$; $H_{\text{пр}} = 0,9 \frac{4V_{\text{пр}}}{\pi D^2}$		

Диаметр питающей бобышки можно определить по номограмме, учитывающей массу и толщину стенки отливки (рис. 6.3), а площади шейки – по табл. 6.4.

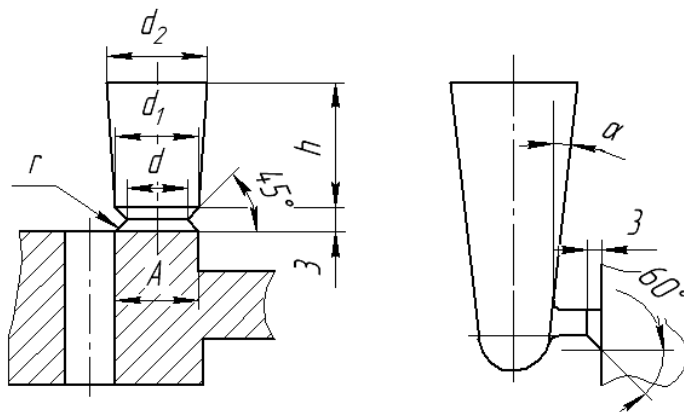


Рис. 6.2. Конструкции питающих выпоров:
a – прямые; *б* – отводные

Таблица 6.3

Размеры прямых питающих выпоров для чугунных отливок

Толщина тела отливки в месте сопряжения с питающим выпором <i>A</i> , мм	Размеры питающего выпора, мм				
	<i>d</i>	<i>d</i> ₁	<i>d</i> ₂	<i>h</i> не менее	<i>r</i>
20–25	20	25	30	60	2
50–55	50	60	80	130	3
75–80	75	90	120	200	4
100–105	100	120	170	250	5
125–130	125	150	200	300	5
150–155	150	180	240	400	5
175–180	175	210	280	450	6
200–205	200	235	320	500	6
225–230	225	270	360	550	6

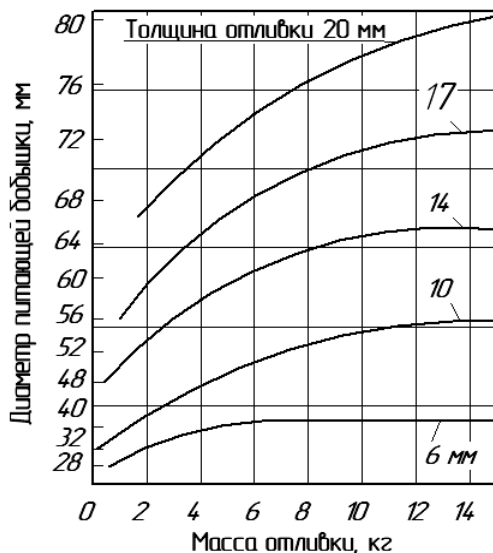


Рис. 6.3. Номограмма для определения размеров бобышек для отливок из ковкого чугуна и стали

Таблица 6.4

Значения площади сечения шейки бобышек для отливок из ковкого чугуна и стали

Радиус основания бобышки, R , мм	15,0	18,0	20,0	22,0	24,0	25,0	26,0	27,0	30,0
Площадь сечения шейки, см^2	1,5	2,4	3,3	4,2	4,8	5,6	6,0	6,4	7,2

В качестве примера рассчитаем объемы и размеры прибылей для отливки «шайба» (рис. 6.1), изготавливаемой из стали 40Л. Ранее было определено, что наиболее оптимальным вариантом является установка четырех прибылей. Таким образом, каждая прибель с учетом зоны действия питает четвертую часть отливки. Объем отливки рассчитываем как объем бруса, длина которого равна периметру по оси шайбы $P = 2\pi R = 3,14 \cdot (1,0 + 0,6)/2 = 2,512$, м.

$$V_{\text{бр}} = 2,512 \cdot 0,2 \cdot 0,15 = 0,075, \text{ м}^3;$$

$$V_0 = 0,075 / 4 = 0,02, \text{ м}^3.$$

Определяем часть объемной усадки сплава, принимающей участие в формировании усадочной раковины (ε'_V). Для отливок из углеродистой стали $\varepsilon'_V = 0,04$. Выбираем закрытую призматическую прибыль с компактной формой горизонтального сечения с рабочим давлением ниже атмосферного. Для таких прибылей отношение объема прибыли ($V_{\text{пр}}$) к объему возникающей в ней усадочной раковины (V_p) принимается равным $\beta = 11$.

По формуле (6.3) определяем объем прибыли ($V_{\text{пр}}$):

$$V_{\text{пр}} = \frac{\beta \varepsilon'_V}{1 - \beta \varepsilon'_V} v_0 = \frac{11 \cdot 0,04}{1 - 11 \cdot 0,04} \cdot 0,02 = 0,0157, \text{ м}^3.$$

Определяем размеры прибыли. Используя рекомендуемые для стального литья (6.5) отношения высоты прибыли ($H_{\text{пр}}$) к диаметру ее основания ($D_{\text{пр}}$), принимаем ее равным 1,25. Так как прибыль имеет форму призмы и устанавливается на верхнюю поверхность отливки, имеющей определенную ширину, то $D_{\text{пр}}$ берется меньше или равной ширине этой поверхности $D_{\text{пр}} = 0,2$ м.

$$\frac{H_{\text{пр}}}{D_{\text{пр}}} \approx 1,25-1,5;$$

$$H_{\text{пр}} = 1,25 \cdot 0,2 = 0,25, \text{ м}.$$

Зная объем прибыли ($V_{\text{пр}}$), ее высоту ($H_{\text{пр}}$) и ширину ($D_{\text{пр}}$) определим ее длину.

$$L = \frac{V_{\text{пр}}}{H_{\text{пр}} \cdot D_{\text{пр}}} = \frac{0,0157}{0,25 \cdot 0,2} = 0,314, \text{ м}.$$

Таким образом, размеры устанавливаемых прибылей позволяют полностью перекрыть зоны их действия, что позволяет получить отливку без образования усадочных дефектов.

Для форм с вертикальной плоскостью разъема наиболее эффективным является метод определения объема прибыли по модулю охлаждения термического узла отливки. Для определения узла отливки, который затвердевает в последнюю очередь, необходимо знать интенсивность отвода тепла от всех частей отливки. С этой целью определяется модуль охлаждения (M_C) как отношение объема питаемого узла отливки (V_C) к площади ее охлаждаемой поверхности (A_C) (4.2) [2, с. 39]:

$$M_C = \frac{V_C}{A_C},$$

где M_C – модуль отливки, см;

V_C – объем отливки, см³

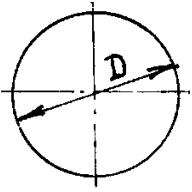
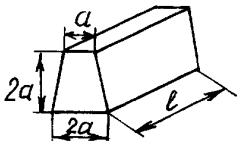
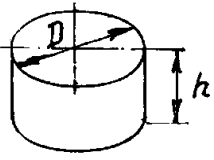
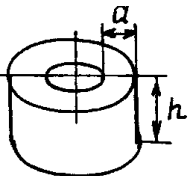
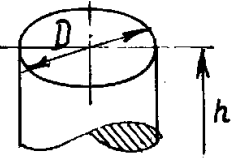
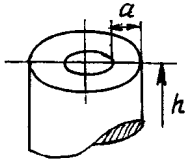
A_C – площадь охлаждаемой поверхности отливки, см².

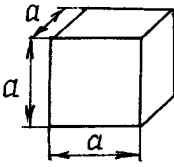
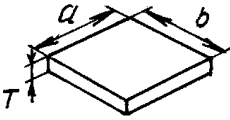
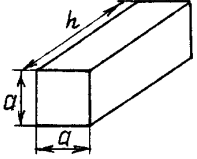
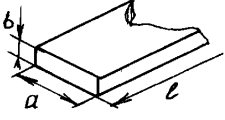
Объем и площадь охлаждаемой поверхности отливки можно определить с использованием программы SolidWorks или расчетным путем, разбивая поверхность на элементарные участки.

В табл. 6.5 представлены формулы для расчета модуля охлаждения для питаемых узлов различной конструкции. Питаемый узел может быть аппроксимирован к одной или нескольким геометрическим формам, представленным в таблице, чтобы получить оценку величины модуля охлаждения.

Таблица 6.5

Формулы для расчета модуля охлаждения

Геометрическая форма	Модуль охлаждения M_R , см	Геометрическая форма	Модуль охлаждения M_R , см
1	2	3	4
<p>Шар</p> 	$\frac{D}{6}$	<p>Брус с трапециевидальным сечением</p> 	$0,43a$
<p>Цилиндр</p> 	$\frac{Rh}{2(R+h)}$ или $\frac{Dh}{2(D+2h)}$	<p>Кольцо</p> 	$\frac{a \cdot h}{2(a+h)}$
<p>Цилиндр с неопределенной высотой</p> 	$\frac{D}{4}$	<p>Кольцо с неопределенной высотой</p> 	$\frac{a}{2}$

1	2	3	4
<p>Куб</p> 	$\frac{a}{6}$	<p>Плита</p> 	<p>С неопределенными длиной (a) и шириной (b), с постоянными длиной (a) и шириной (b)</p> $\frac{abT}{2(ab + aT + bT)}$
<p>Брус квадратного сечения</p> 	$\frac{a \cdot h}{2(a + h)}$	<p>Брус прямоугольного сечения</p> 	<p>С неопределенной длиной,</p> $\frac{a \cdot b}{2(a + b)}$ <p>с постоянной длиной (l)</p> $\frac{abl}{2(ab + al + bl)}$

Для определения размеров прибыли необходимо найти модуль охлаждения прибыли (M_R). Модуль охлаждения прибыли зависит от модуля охлаждения питаемой части отливки, вида сплава и определяется как произведение модуля отливки и коэффициента критерия модуля. Модуль прибыли отливки, который зависит от коэффициента критерия модуля K_M , определяем по выражению (6.6):

$$M_R \geq K_M \cdot M_C, \quad (6.6)$$

где M_R – модуль прибыли, см;

M_C – модуль отливки, см;

K_M – коэффициент критерия модуля.

Значение коэффициента K_M зависит от марки заливаемого сплава и берется в следующих пределах:

0,6–1,0 для эвтектического серого чугуна;

1,8–1,1 для ферритного железа;

1,2–1,4 для ковкого чугуна;

1,2–1,4 для стали;

1,2–1,4 для медных сплавов;

0,8–1,1 для алюминиевых сплавов.

Знак неравенства в формуле (6.4) указывает на то, что размеры прибыли должны быть всегда немного больше теоретического объема узла питания. Это обусловлено тем, что поверхностный слой прибыли затвердевает и не является объемом питания.

Фирма DISA разработала две стандартные формы прибыли: цилиндрическую и сферическую для форм с вертикальной плоскостью разреза (табл. 6.6, 6.7). По значению M_F выбираем номер и определяем размеры прибыли.

Таблица 6.6

Стандартные цилиндрические прибыли

Схема прибыли	№	Диаметр D_R , мм	Объем V_F , см ³	Модуль M_F , см
	1	20	9,4	0,37
	2	25	18,4	0,47
	3	30	31,8	0,56
	4	35	50,5	0,66
	5	40	75,4	0,75
	6	45	107,3	0,84
	7	50	147,3	0,94
	8	55	196,0	1,03
	9	60	254,5	1,13
	10	65	323,5	1,22
	11	70	404,0	1,31
	12	75	497,0	1,41
	13	80	603,0	1,50
	14	85	723,0	1,59
	15	90	859,0	1,69
	16	95	1010,0	1,78
	17	100	1178,0	1,89

Таблица 6.7

Стандартные сферические прибыли

Схема прибыли	№	Диаметр D_R , мм	Объем V_F , см ³	Модуль M_F , см
	1	20	4,2	0,33
	2	25	8,1	0,42
	3	30	14,0	0,50
	4	35	22,3	0,58
	5	40	33,3	0,67
	6	45	47,4	0,75
	7	50	65,0	0,83
	8	55	86,5	0,92
	9	60	112,3	1,00
	10	65	142,8	1,08
	11	70	178,4	1,17
	12	75	219,4	1,25
	13	80	266,2	1,33
	14	85	319,3	1,42
	15	90	379,1	1,50
	16	95	445,8	1,58
	17	100	520,0	1,67

Прибыль соединяется с отливкой специальным каналом, который называется шейкой. Определение размеров шейки прибыли является одним из наиболее существенных вопросов питания отливки. Если шейка затвердеет раньше питаемого узла отливки, то поступление из прибыли дополнительного количества металла прекращается и в отливке образуются дефекты усадочного характера (раковины, пористость, утяжины и др.).


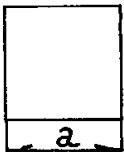
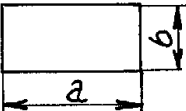
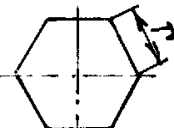
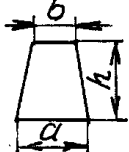
Полагают, что модули затвердевания шейки прибыли (M_N) являются достаточными для обеспечения подачи металла внутрь отливки до затвердевания жидкой фазы, когда диаметр поперечного сечения шейки прибыли (D_N) больше или равен одной трети диаметра поперечного сечения прибыли (D_R):

$$D_N > D_R/3.$$

Площадь круглого сечения шейки прибыли (A_N) диаметром (D_N) легко может быть переведена в площадь поперечного сечения другой формы (табл. 6.8). Пример расчета цилиндрической прибыли приведен в разделе 4.

Таблица 6.8

Площади поверхностей некоторых геометрических форм,
применяемых для шеек прибылей

Геометрическая форма шеек	Расчетные формулы, мм
<p data-bbox="272 528 415 555">Окружность</p> 	$\frac{\pi D^2}{4}$
<p data-bbox="295 711 389 738">Квадрат</p> 	a^2
<p data-bbox="253 908 434 935">Прямоугольник</p> 	$a \cdot b$
<p data-bbox="258 1067 428 1094">Шестигранник</p> 	
<p data-bbox="288 1235 398 1262">Трапеция</p> 	$\frac{a+b}{2} \cdot h$

7. ВЫБОР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ХОЛОДИЛЬНИКОВ

В случаях, когда невозможно обеспечить полное питание всех частей отливки от прибыли, применяются холодильники, которые позволяют ускорять затвердевание тепловых узлов. В зависимости от расположения холодильников они подразделяются на наружные, которые устанавливаются непосредственно в литейной форме, и внутренние, устанавливаемые в полости формы и заливаемые металлом.

Наружные холодильники по конфигурации подразделяются на плоские; прямолинейные круглого, квадратного или иного профиля, криволинейные; фасонные или переменного профиля. Изготавливаются из проката и литьем из чугуна или других сплавов. В отдельных случаях применяют холодильники из материалов, обладающих повышенной теплоаккумулирующей способностью (графит, корунд и т. п.), а при захлаживании фасонных поверхностей эффективным является применение захлаживающих смесей, содержащих до 60 % колотой чугунной дроби.

При захлаживании протяженных направляющих станин и других чугунных отливок холодильники делают со скосами или недостающими до угла для предотвращения отбела и небольшой длины, так как протяженные холодильники сильно коробятся.

Для определения толщины (h_x) наружных холодильников для фланцев и местных приливов с диаметром вписанной окружности $D_{в.о}$ можно воспользоваться эмпирическими уравнениями:

для фланцев

$$h_x = 0,14 D_{в.о}^{1,375};$$

для прилива

$$h_x = 0,19 D_{в.о}^{1,375};$$

Площадь холодильника должна превышать площадь охлаждаемой поверхности в 1,1 раза.

В зависимости от назначения внутренние холодильники бывают двух видов: 1) удаляемые при механической обработке отливок,

например, когда они расположены по осям механически обрабатываемых отверстий и высверливания вместе с припусками на механическую обработку; 2) сохраняющиеся в теле отливки, то есть они являются составными частями детали.

Диаметр удаляемого внутреннего холодильника зависит от диаметра обрабатываемого отверстия и определяется в соответствии с табл. 7.1.

Таблица 7.1

Диаметр внутреннего холодильника
для обрабатываемых отверстий

Диаметр обрабатываемого отверстия, мм	12	16	20	30	40	50	60	90
Диаметр внутреннего холодильника, мм	3–4	5–8	8–12	12–15	15–20	20–25	25–30	35–40

Неудаляемые внутренние холодильники подразделяются на цилиндрические, спиральные, плоские и сборные.

Цилиндрические холодильники устанавливаются в сочленениях стенок отливок. Размеры цилиндрических холодильников, помещаемых в центре окружности, вписанной в X-, T-, L-образные узлы отливок, можно определять по графику (рис. 7.1).

По сравнению с цилиндрическими, спиральные холодильники имеют большие размеры в поперечном сечении, поэтому способны более равномерно охлаждать все части теплового узла и имеют некоторое преимущество в предотвращении возможности образования горячих трещин в сочленениях стенок. Применение этих холодильников допускается, если отношение питающей стенки отливки к питаемой составляет не менее 0,75 и невозможно применить наружные или прутковые холодильники.

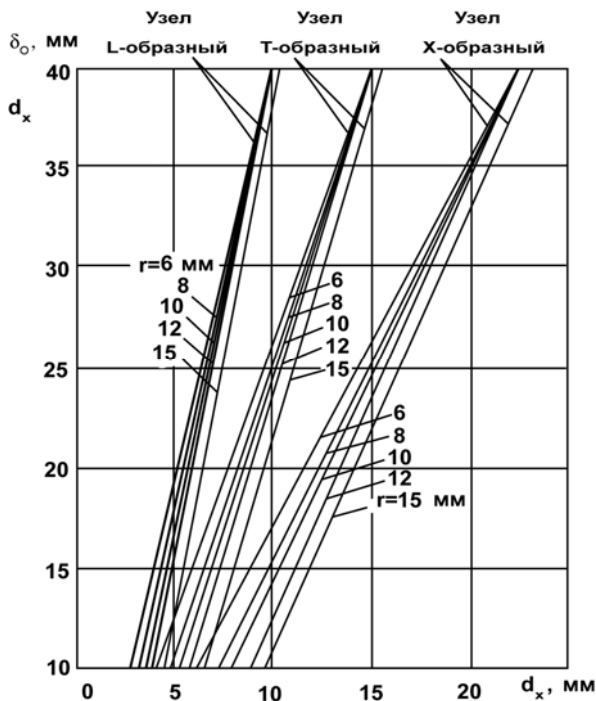


Рис. 7.1. Зависимость диаметра внутреннего холодильника от толщины стенок L-, Т- и Х-образных сопряжений и радиуса закругления сочленения смежных стенок

Порядок расчета спиральных холодильников следующий:

1. Определить диаметр окружности D_y , вписанной в питаемый узел.
2. Определить относительную массу части отливки G_q , тепло которой расходуется на нагрев холодильника. Принимается, что величина G_q равна массе цилиндрической отливки, диаметр которой равен 1,05–1,15. Большое значение D_y присуще Х-образному сочленению, а наименьшее L-образному.

Длину этой цилиндрической отливки условно принимают равной 1 м.

3. Массу G_x спирального холодильника длиной 1 м, отвечающую указанному требованию, а также условию свариваемости холодильника с литой деталью, принимают равной $(0,02–0,03)G_q$.

4. По данным табл. 7.2 подбирают спиральный холодильник (рис. 7.2), масса которого уже известна, с прутками-сердечниками или без них.

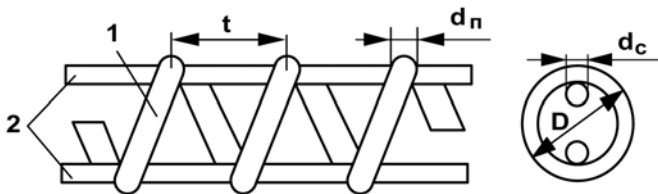


Рис. 7.2. Спиральный холодильник:
1 – спираль; 2 – прутки-сердечники

Наружный диаметр спирали D принимают с таким расчетом, чтобы расстояние по поверхности формы до стенок холодильника было $l \geq 3d_n$ (d_n – диаметр прутка спирали с шагом t).

Таблица 7.2

Размеры спиральных холодильников

Основные размеры спирали, мм				Число прутков-сердечников	Масса 1 м, кг	
d_n	D	t	прутков-сердечников		спирали без прутков-сердечников	спирали с прутками-сердечниками
1–1,5	8	4–6	3	1	0,039	0,095
	12	4–6	4	1	0,063	0,163
2–1,5	15	6–10	4	1	0,154	0,254
	25	6–10	4	1	0,278	0,378
	35	6–10	6	1	0,400	0,622
3–4	30	10–15	6	1	0,564	0,786
	45	10–15	6	2	0,842	1,286
	60	10–15	8	2	1,030	1,820
5–6	50	20–25	8	3	1,230	2,415
	60	20–25	10	3	1,490	3,341
	70	20–25	12	3	1,750	4,414

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кукуй, Д. М. Теория и технология литейного производства : учебник : в 2 ч. Ч. 2. : Технология изготовления отливок в разовых формах / Д. М. Кукуй, В. А. Скворцов, Н. В. Андрианов. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2011. – 406 с.: ил. – (Высшее образование).
2. Справочник по эксплуатации автоматической линии Дисаматик 2013 МК5-4.
3. Технология литейного производства / Б. С. Чуркин [и др.]; под ред. Б. С. Чуркина. – Екатеринбург: Изд-во урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2000.
4. Технология литейного производства: литье в песчаные формы / А. П. Трухов [и др.]; под ред. А. П. Трухова. – Москва: Академия. 2005.
5. Рабинович, Б. В. Введение в литейную гидравлику – Москва: Машиностроение, 1966. – 423 с.: ил.
6. Справочник по чугунному литью / под ред. Н. Г. Гиршовича. Москва: Машгиз, 1960. – 800 с.: ил.

Учебное издание

СКВОРЦОВ Валерий Александрович
НИКОЛАЙЧИК Юрий Александрович

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ
ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ РАЗОВЫХ ФОРМ**

Учебно-методическое пособие к практическим занятиям
для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины
и технология литейного производства»

Редактор *Ю. В. Ходочинская*
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 30.10.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 6,39. Уч.-изд. л. 5,00. Тираж 100. Заказ 474.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.

