

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

На правах рукописи

КОРОТЧЕНКО ИГОРЬ АНДРЕЕВИЧ



**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ТОНКОСТЕННЫХ ПРОТЯЖЁННЫХ ОТЛИВОК ИЗ ЭВТЕКТИЧЕСКИХ
СИЛУМИНОВ НА МАШИНАХ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ С
ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ХОЛОДНОЙ КАМЕРОЙ ПРЕССОВАНИЯ**

Специальность: 2.6.3. Литейное производство (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор

Смыков Андрей Федорович

Москва, 2024

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

<i>ЛПД</i>	- литьё под давлением
<i>ЛС</i>	- литниковая система
$b_{\text{ф}}$	- коэффициент тепловой аккумуляции формы
β	- коэффициент термического расширения
$v_{\text{вп}}$	- скорость впуска расплава в форму
$p_{\text{м}}$	- давление прессования при затвердевании отливки
$\tau_{\text{зап}}$	- время заполнения полости формы расплавом
v	- скорость прессового поршня
$P_{\text{п}}$	- усилие прессования
$P_{\text{з}}$	- усилие запираания
v_i	- скорость прессового поршня на разных фазах работы машины
P	- усилие, развиваемое прессовым поршнем
P_i	- усилие, развиваемое прессовым поршнем на разных фазах работы машины
t	- время
t_i	- длительность разных фаз работы машины
s_i	- расстояние, проходимое прессовым поршнем на разных фазах работы машины
L	- максимальный ход прессового поршня
H	- рабочая длина камеры прессования
$\delta_{\text{пит}}$	- толщина питателя
$u^{\text{кр}}$	- критическая скорость потока сплава
s	- перемещение прессового поршня
p_1	- давление в нештоковой полости гидроцилиндра
p_2	- давление в штоковой полости гидроцилиндра
$p_{\text{а}}$	- давление в аккумуляторе
Δp_g	- пик динамического давления (гидроудар)
t_1	- время фазы перекрытия заливочного окна
t_2	- время фазы сбора расплава в камере прессования
t_3	- время фазы заполнения расплавом полости пресс-формы
t_4	- время фазы подпрессовки
$t_{\text{р1}}$	- время срабатывания и переключения распределителя Р1
$t_{\text{р2}}$	- время срабатывания и переключения распределителя Р2
$T_{\text{зал}}$	- температура заливки
$\Delta T_{\text{ковш}}$	- охлаждение расплава до заливки в камеру прессования
$\Delta T_{\text{кп}}$	- охлаждение расплава в камере прессования до начала движения прессового поршня
$\Delta T_{\text{лс}}$	- охлаждение расплава при его подаче поршнем в пресс-форму
$\Delta T_{\text{отл}}$	- охлаждение расплава в пресс-форме
$T_{\text{рк}}$	- расчетная температура расплава в разливочном ковше

$T_{нк}$	- начальная температура расплава в разливочном ковше
α_c	- коэффициент теплообмена на поверхностях охлаждения расплава и ковша
$F_{по}$	- площадь поверхности охлаждения
G_o	- масса расплава
G_k	- масса ковша
τ_k	- время нахождения расплава в ковше
c'_1	- удельная теплоемкость расплава
c_k	- удельная теплоемкость ковша
T_c	- температура окружающей среды
k_T	- коэффициент теплопередачи через слой смазки и окислов
$\lambda_{см}$	- теплопроводность слоя смазки и окислов
$X_{см}$	- толщина слоя смазки и окислов
$F_{р\text{кп}}$	- площадь поверхности контакта расплава и камеры прессования
$T_{нкп}$	- начальная температура расплава в камере прессования
$Q_{тр}$	- теплота, выделяемая при трении расплава о форму
$A_{тр}$	- работа сил трения
$P_{тр}$	- сила трения расплава о стенки проходного канала
L_k	- длина рассматриваемого участка
V'_1	- объем расплава
ρ'_1	- плотность расплава сплава
$\Delta T_{тр}$	- повышение температуры расплава из-за сил трения
$F_{пск}$	- площадь поперечного сечения проходного канала
$\xi_{сд}$	- сопротивление на трение расплава по длине канала
$\xi_{мс}$	- приведенный суммарный коэффициент сопротивления за счет изменения геометрии канала
u_k	- средняя скорость течения расплава в канале
g	- ускорение силы тяжести
λ_{Re}	- коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от величины значения критерия Рейнольдса
Re	- гидравлический (эквивалентный) диаметр проходного канала
μ'_1	- коэффициент динамической вязкости расплава сплава
$f_{кп}$	- площадь поперечного сечения камеры прессования
$\xi'_{мсi}$	- коэффициент сопротивления соответствующий виду местного сопротивления
$f_{пит}$	- площадь сечения питателя
$V_{отл}$	- объем отливки
$H_{пк}$	- высота подводящего канала
$B_{пк}$	- ширина подводящего канала
$b_{пит}$	- ширина питателя
$D_{кп}$	- диаметр камеры прессования
$F_{кп}$	- площадь сечения камеры прессования
α	- коэффициент теплоотдачи

λ	- коэффициент теплопроводности расплава
d	- характерный размер канала формы
u	- скорость движения расплава
ν	- коэффициент кинематической вязкости расплава
Nu	- критерий Нуссельта
Re	- критерий Рейнольдса
Pr	- критерий Прандтля
Gr	- критерий Грасгофа
l	- толщина стенки отливки
λ_0	- коэффициент теплопроводности жидкого сплава в покое
λ_1	- коэффициент теплопроводности движущегося потока расплава
b_1	- коэффициент тепловой аккумуляции движущегося потока расплава
b_0	- коэффициент тепловой аккумуляции отливки (в покое)
B_ϕ	- термическая проводимость формы в пределах ее характерного размера
X_ϕ	- характерный размер формы
λ_ϕ	- коэффициент теплопроводности материала пресс-формы
T_L	- температура ликвидус
T_ϕ	- температура пресс-формы
c_1	- удельная теплоёмкость расплава в жидком состоянии
ρ_1	- плотность расплава в жидком состоянии
R_0	- приведённый размер канала
θ	- угол конусности
ξ''_i	- коэффициент сопротивления, соответствующий виду местного сопротивления
$\xi'_{p \text{ сеч} i}$	- коэффициент сопротивления на трение каналов с внезапным расширением
$\xi'_{pk \text{ сеч} i}$	- коэффициент сопротивления на трение каналов с конусным расширением
K_a	- симплекс подобия физических свойств
ΔT_Σ	- суммарные потери перегрева расплава
$БД$	- база данных
$ППП$	- пакет прикладных программ
$САМ$	- система автоматизированного моделирования
y	- функция длины канала отливки
X_1	- первый фактор
X_2	- второй фактор
X_3	- третий фактор
$b_0, b_1,$ b_2, b_3	- коэффициенты уравнения регрессии
$ОТЗ$	- обратная тепловая задача
Q	- расход расплава

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	2
ВВЕДЕНИЕ	7
1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И МЕТОДИК РАСЧЕТА ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ	16
1.1. Обзор основных параметров технологического процесса литья под давлением 16	
1.1.1. Технологические параметры машин литья под давлением	16
1.1.2. Потери перегрева расплава в технологическом процессе литья под давлением	22
1.2. Литниковые системы отливок при литье под давлением	27
1.2.1. Существующая классификация литниковых систем при литье под давлением	27
1.2.2. Существующие методики расчета литниковых систем при литье под давлением	31
1.2.3. Применение методик расчета литниковых систем на практике	39
1.3. Математические модели расчета тепловых потерь расплава при заполнении пресс-формы	42
1.3.1. Алгоритмическая математическая модель	44
1.3.2. Аналитическая математическая модель	46
1.4. Выводы по первой главе	49
2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДИК И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ	51
2.1. Разработка классификации внешних литниковых систем для литья под давлением	51
2.2. Оценка применимости модели малой интенсивности охлаждения и типа коэффициента теплообмена в тепловых расчетах для литья под давлением	61
2.3. Разработка методики расчета потерь перегрева расплава на основе модели малой интенсивности при решении прямой задачи, с учетом сил трения при движении расплава по каналам пресс-формы	72

2.4. Расчет особенностей потерь перегрева расплава при заполнении пресс-форм для отливок разной конфигурации.....	82
2.5. Выводы по второй главе.....	86
3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ	88
3.1. Новая методика расчета литниковых систем для тонкостенных протяженных отливок на основе решения обратной тепловой задачи.....	88
3.2. Определение области применения разработанной новой методики расчета литниковых систем	100
3.3. Разработка методики выбора места подвода расплава к отливке	105
3.4. Выводы по третьей главе.....	108
4. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ОТЛИВОК	110
4.1. Проектирование и изготовление пресс-формы для отливки «Радиатор»... ..	110
4.2. Алгоритм и программа для автоматизированного определения потерь перегрева расплава в элементах литниковой системы.....	124
4.3. Выводы по четвертой главе.....	128
ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	130
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	132
Приложение А.....	145
Акты о внедрении работы.....	145
Приложение Б.....	147
Код программы для автоматизированного определения потерь перегрева расплава в элементах литниковой системы.....	148

ВВЕДЕНИЕ

Литье под давлением (ЛПД), как способ изготовления отливок для машиностроения и приборостроения начал активно развиваться с 1920-х годов. Первоначально данный способ применялся для литья цинковых, магниевых, а потом и алюминиевых сплавов. Для получения тонкостенных отливок использовались машины ЛПД с горячей камерой прессования, а для получения более толстостенных отливок применялись машины ЛПД с холодной вертикальной и горизонтальной камерами прессования [1, 2]. Согласно [3,4], в середине 1970-х годов способ ЛПД имел три направления развития: первое – литье с низкими скоростями впуска через толстые питатели, для получения толстостенных несложных отливок; второе – литье с высокими скоростями впуска через тонкие питатели, с образованием дисперсного заполнения, для получения тонкостенных отливок; третье – литье со средними скоростями впуска, с образованием турбулентных и дисперсных потоков, для получения отливок с неравномерными толщинами стенок.

Номенклатура отливок из алюминиевых сплавов, изготавливаемых в середине и конце 20-го века довольно широка [5]. Это различные корпусные детали автомобильной промышленности: корпус блока цилиндров, коробки передач, различные кронштейны; это различные детали авиационной промышленности, а также это разнообразные корпуса, крышки и кронштейны приборов и бытовой техники. Толщины стенок отливок из алюминиевых сплавов, преимущественно, находились в диапазоне 3 – 15 мм, а масса отливок составляла от нескольких десятков грамм до десятков килограмм [6]. Отдельным преимуществом способа ЛПД можно ещё отметить возможность получения армированных отливок. Например, отливки из алюминиевых сплавов, армируемые вставками из черных сплавов или сплавов на основе меди [7-9].

Для производства отливок из алюминиевых сплавов использовались ранее и применяются в настоящее время преимущественно машины ЛПД с холодной

горизонтальной камерой прессования. Для получения качественных отливок существует ряд методик как по расчету литниковых систем (ЛС) [10, 11], так и рекомендации по основным технологическим параметрам способа литья, таким как скорость впуска расплава, время заполнения пресс-формы, температура пресс-формы, давление подпрессовки, температура заливки расплава [12-17]. Причем надо отметить, что возможности машин ЛПД в течение 20-го века сильно менялись, с развитием технологий [18-20]. Начиная от первых компрессорных машин ЛПД, на смену которым пришли поршневые машины ЛПД с высокими скоростями движения прессового поршня и высоким давлением прессования. С развитием возможностей машин ЛПД менялась и номенклатура отливок, в сторону усложнения конфигурации отливок и снижения их массы, за счет уменьшения толщины стенок [21- 24].

Существующие методики расчета ЛС для отливок, получаемых ЛПД, основаны на эмпирических зависимостях, выявленных опытным путем, и сформированных для укрупненных групп отливок. В основе этих методик лежит принцип нахождения площади узкого сечения ЛС – питателя, исходя из условия равенства расхода расплава в элементах ЛС, зная объем отливки, задавая усредненные значения скорости впуска расплава в полость отливки и среднего значения времени заполнения пресс-формы. Эти усредненные параметры корректируются эмпирическими коэффициентами, учитывающими: конфигурацию отливки, давление прессования, материал отливки и среднюю толщину стенки отливки. Данные методики расчета ЛС были разработаны в середине 20-го века и в дальнейшем не претерпевали изменения и корректировок, хотя, как уже было отмечено ранее, возможности машин ЛПД расширялись, а отливки, получаемые этим способом литья, становились все более сложными [25-29].

Как было отмечено, одним из важных технологических параметров при ЛПД является температура заливки расплава [30]. С одной стороны, этот параметр влияет на жизненный ресурс пресс-формы, т.е. на ее стойкость [31] (разница между температурой пресс-формы и температурой заливаемого сплава составляет сотни градусов). Соответственно, чем меньше этот перепад температур, тем меньшее температурное воздействие оказывается на пресс-форму, что продлевает ее рабочий

ресурс [32, 33]. С другой стороны, температура заливки направлена на решение задачи качественного заполнения расплавом всех полостей пресс-формы без брака в виде недоливов и неспаев. В результате расплав не должен охлаждаться ниже температуры ликвидуса в наиболее удаленных от питателей частях фасонной литой заготовки. Поэтому температура заливки выбирается из учета потерь перегрева расплава в технологическом процессе литья, которые прибавляются к температуре ликвидуса расплава. Основные существующие методики расчета ЛС учитывают следующие составляющие потерь перегрева расплава: потери перегрева при зачерпывании расплава из раздаточной печи и транспортировке его до камеры прессования; потери перегрева расплава, залитого в камеру прессования; потери перегрева расплава при движении по каналам пресс-формы до входа в отливку. Т.е. потери перегрева расплава при заполнении полости отливки не учитывались. Для толстостенных отливок такая логика вполне понятна и применима, т.к. если температура расплава при прохождении самого узкого сечения – питателя не доходит до температуры ликвидуса, то и толстостенная отливка не очень сложной конфигурации должна полностью заполниться.

Однако, начиная с конца 20-го века, возможности машин ЛПД с горизонтальной холодной камерой прессования позволяют получать отливки толщиной стенки около 1 мм, сложной конфигурации, в частности, длиной 300 – 500 мм, т.е. протяженные отливки [34-37]. Для данной группы отливок принцип, по которому можно было не учитывать потери перегрева расплава при заполнении полости отливки, уже не может быть применим. Т.к. потери перегрева расплава при заполнении полости отливки могут быть сравнимы, а то и выше значения всех потерь перегрева до попадания расплава в полость пресс-формы. А это, в свою очередь, неизбежно окажет влияние и на методику расчета ЛС, т.к. время заполнения расплавом формы или расход, чтобы обеспечить минимальные значения температуры заливки для заполнения полости пресс-формы, будут существенно отличаться от существующих методик. А значит и площади поперечного сечения элементов ЛС должны быть другими. Этот вывод косвенно подтверждает практика ряда литейных заводов России, когда при разработке ЛС для сложных тонкостенных протяженных отливок

используются не существующие методики расчета ЛС, а в большей степени опыт литья подобных отливок на этих предприятиях [38].

Актуальность работы:

В современном литейном производстве одной из актуальных задач является изготовление тонкостенных протяженных отливок с заданными эксплуатационными свойствами, напрямую зависящими от выбранных проектных решений разработанного технологического процесса. Основными проектными решениями, определяющими ход и результаты технологического процесса, являются: тип и конфигурация литниковой системы (ЛС) и технологические параметры литья, позволяющие существенно увеличить стойкость оснастки и, как следствие, ресурс ее работы, что особенно актуально для сложных и дорогостоящих пресс-форм.

Для производства тонкостенных протяженных отливок из алюминиевых сплавов, в настоящее время, применяются преимущественно машины литья под давлением (ЛПД) с холодной горизонтальной камерой прессования. Следует отметить, что технологические характеристики машин ЛПД постоянно совершенствуются и, в этой связи, появляются новые возможности для получения более сложных по геометрии отливок. Однако, их внедрение ограничивается отсутствием достаточной методологической базы, связанной с решением трудноформализуемых задач проектирования процессов литья на машинах ЛПД тонкостенных протяженных отливок из эвтектических силуминов, например, выбора типа литниковой системы, определения количества питателей и мест их подвода к отливке, а так же задач расчета размеров элементов ЛС, температуры и скорости заливки расплава и других литейных параметров.

Существующие методики расчета параметров ЛС для заготовок, получаемых методом ЛПД, основаны на эмпирических зависимостях, сформированных для укрупненных групп отливок в середине 20-го века и в дальнейшем не претерпевших существенных изменений, несмотря на расширение возможностей машин ЛПД и усложнение геометрий изготавливаемых отливок. В результате такие способы проектирования для литья протяженных тонкостенных отливок не являются надежными и требуют корректировки полученных результатов, что приводит к

неоправданному увеличению сроков технологической подготовки и материальных затрат. Кроме того, нет уверенности, что разработанные режимы литья являются рациональными.

В связи с этим, развитие теории и практики изготовления тонкостенных протяженных отливок из эвтектических силуминов на машинах ЛПД с горизонтальной холодной камерой прессования на основе изучения закономерностей теплообмена и течения расплава в каналах пресс-формы является актуальной задачей.

Цель работы: разработка методологии проектирования литниковых систем, обеспечивающих получение тонкостенных протяженных отливок из эвтектических силуминов на машинах литья под давлением с горизонтальной холодной камерой прессования без поверхностных дефектов типа неспай и неслитина.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- систематизировать типовые элементы для внешних литниковых систем, применяемых в литье под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, в единый классификатор;
- обосновать выбор математической модели малой интенсивности охлаждения отливки в пресс-форме для проведения тепловых расчетов при литье под давлением тонкостенных протяженных литых заготовок;
- разработать алгоритм и на его основе программу расчета потерь перегрева расплава с учетом скорости движения расплава в каналах пресс-формы и выделения теплоты от сил трения расплава о стенки пресс-формы.
- определить границы применимости термина «протяжённость», в отношении тонкостенных каналов пресс-формы с учетом заполняемости их расплавом;
- определить характер течения и особенности теплообмена расплава эвтектического силумина при заполнении им тонкостенных протяженных каналов пресс-формы при литье под давлением;
- разработать методику расчета температуры заливки расплава и параметров элементов внешней литниковой системы при литье под давлением

эвтектических силуминов на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, обеспечивающих получение отливок без дефектов типа неспай и неслитина;

– разработать методику выбора места подвода расплава эвтектических силуминов к фасонным отливкам с тонкостенными протяженными элементами при литье под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования.

Основные положения, которые выносятся на защиту:

– Обоснованность применения модели малой интенсивности охлаждения отливки в литейной форме для решения задачи контактного теплообмена движущегося расплава эвтектического силумина в пресс-форме литья под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования.

– Обоснованность способа проектирования литниковых систем для изготовления фасонных тонкостенных отливок ЛПД на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, основанного на новом аналитическом решении задачи расчета температуры заливки расплава и скорости расплава в питателе.

– Результаты расчетов численных исследований в системе компьютерного моделирования FLOW 3D по определению характера течения расплава эвтектического силумина и интенсивности его теплообмена с пресс-формой, в зависимости от толщины стенки отливки, скорости расплава в питателе и температуры заливки.

– Регрессионные зависимости для определения потерь перегрева расплава эвтектического силумина при заполнении полости пресс-формы, в зависимости от толщины стенки отливки и скорости расплава в питателе.

Научная новизна:

– Теоретически обоснован и экспериментально подтвержден выбор модели малой интенсивности охлаждения отливки, учитывающий аккумулирующую способность формы, для расчетов тепловых потерь расплава эвтектического силумина при заполнении тонкостенных протяженных каналов пресс-форм литьем под давлением.

– Разработана методика расчета потерь перегрева расплава эвтектического силумина при заполнении им каналов прессформы литьем под давлением с учетом характера движения расплава и выделения теплоты от сил трения.

– На основе модели малой интенсивности охлаждения отливки разработана методика проектирования литниковых систем для протяженных тонкостенных отливок, изготавливаемых литьем под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования из сплавов эвтектических силуминов, основанная на решении задач расхода и теплообмена расплава с пресс-формой на разных участках его движения, выбора вида литниковой системы, определения размеров и мест установки питателей к отливке.

– Для реализации методики проектирования литниковых систем протяженных тонкостенных отливок из сплавов эвтектических силуминов, решены следующие основные задачи:

- разработан классификатор литниковых систем, позволяющий однозначно идентифицировать возможные сочетания взаимных расположений подводящего канала, питателей и их геометрических параметров;

- получено уравнение регрессии, позволяющее определить границы применимости термина «протяжённость», в отношении тонкостенных каналов прессформы, в зависимости от сечений этих каналов и скорости течения расплава в них;

- разработана методика выбора мест установки питателей к отливке с учетом тепловой теории литья, обеспечивающая снижение перегрева расплава, подаваемого в пресс-форму;

- получено расчетное уравнение для модели малой интенсивности охлаждения отливки в литейной форме, позволяющее по заданным тепловым потерям расплава при заполнении полости пресс-формы определять значения температуры заливки и скорости впуска в питателе.

Практическая значимость работы:

– Предложена классификация внешних литниковых систем для изготовления отливок литьем под давлением на машинах с холодной горизонтальной

камерой прессования. Данная классификация позволяет идентифицировать тип литниковой системы по геометрическим характеристикам подводящего канала и питателя и используется при их автоматизированном проектировании.

– Разработан алгоритм и на его основе программа расчета суммарных потерь перегрева расплава эвтектического силумина при движении в каналах пресс-формы, оформляющих элементы литниковой системы. Данная программа предназначена для автоматизации тепловых расчетов при проектировании технологического процесса изготовления отливок литьем под давлением.

– Разработанная методика применена при проектировании литниковой системы отливки «Радиатор». Опытная партия отливок «Радиатор» изготовлена без поверхностных дефектов типа неспай и неслитина.

– Полученные в работе результаты используются в учебном процессе на кафедре «Литейные технологии» ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана в лекционных курсах «Проектирование литейной оснастки», «Оборудование литейных цехов», а также в курсовом и дипломном проектировании.

Методология и методы исследования:

Работа выполнена с применением программы для моделирования процессов заполнения расплавом пресс-формы и кристаллизации отливки FLOW 3D. Обработка результатов моделирования и статистические расчеты проводились в программе MS Excel. Для изготовления пресс-формы применялись фрезерные и токарные станки с ЧПУ Micron UCP 800 Duro и Traub TNA 300. Для проведения экспериментов по заливке расплава в пресс-форму применялась машина ЛПД TST - 1200 К.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов исследований, анализа и статистической обработки экспериментальных данных, подтвержденных сравнительным анализом численных и натуральных экспериментов, а также практическим использованием результатов при разработке технологических процессов.

Личный вклад соискателя выражается в планировании, организации и проведении экспериментальных исследований, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов.

Апробация работы. Основные материалы диссертационной работы обсуждались на XVI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 19-22 сентября 2023 года); на XV международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 1-3 ноября 2023 года); на VIII международной научной конференции молодых ученых «Инженерное и экономическое обеспечение деятельности транспорта и машиностроения» (Беларусь, Гродно, 30 мая 2024 года); на XVII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 24-27 сентября 2024 года); на XII Международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии» (Москва, 29 октября-1 ноября 2024 года).

Публикации. По теме диссертации автором опубликовано 11 научных работ, из них 6 работ в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 5 работ в сборниках научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов по работе, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка из 125 наименований и приложений. Изложена на 158 страницах машинописного текста, содержит 12 таблиц и 64 рисунка.

1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ И МЕТОДИК РАСЧЕТА ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

1.1. Обзор основных параметров технологического процесса литья под давлением

Литьё под давлением является машинным процессом и используется преимущественно для литья фасонных отливок с тонкостенными стенками отливок из алюминиевых сплавов. Существует несколько разновидностей машин для литья под давлением: с горячей камерой прессования, с холодной вертикальной камерой прессования, с холодной горизонтальной камерой прессования. Наибольшее распространение нашли машины для литья с холодной горизонтальной камерой прессования.

1.1.1. Технологические параметры машин литья под давлением

Согласно [39], основными технологическими параметрами при литье под давлением являются: скорость впуска расплава в форму $v_{вп}$, давление прессования при затвердевании отливки p_m , время заполнения полости формы расплавом $\tau_{зап}$, температура пресс-формы, температура заливки расплава. Эти технологические параметры обеспечиваются следующими параметрами машины литья под давлением: скорость прессового поршня v , усилие прессования $P_{п}$, усилие запирания $P_з$.

В технологическом цикле работы машины литья под давлением можно выделить следующие основные операции [43], показанные на рисунке 1.1.1.

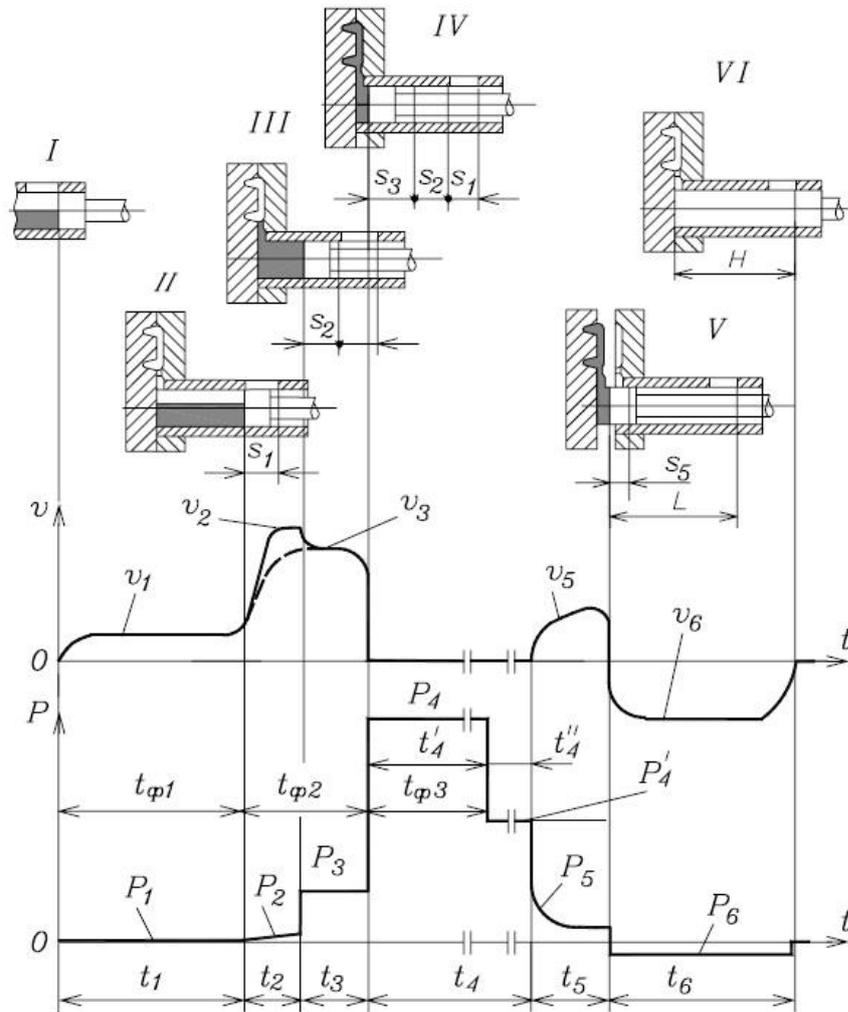


Рисунок 1.1.1 – Фазы работы механизма прессования машины ЛПД

где: v – скорость прессового поршня; v_i – скорость прессового поршня на разных фазах работы машины; P – усилие, развиваемое прессовым поршнем; P_i – усилие, развиваемое прессовым поршнем на разных фазах работы машины; t – время; t_i – длительность разных фаз работы машины; s_i – расстояние, проходимое прессовым поршнем на разных фазах работы машины; L – максимальных ход прессового поршня; H – рабочая длина камеры прессования.

Первая фаза - это перекрытие прессовым поршнем заливочного окна камеры прессования. Этот период начинается, когда расплав уже залит в камеру прессования. Данной фазе характерна невысокая скорость движения прессового поршня, порядка $0,1 \dots 0,3$ м/с, чтобы не допустить выплёскивания расплава через заливочное окно в камере прессования.

Вторая фаза - сбор расплава в камере прессования. В этом периоде важно не допустить обратной волны расплава в камере прессования и захвата воздуха [40]. Поэтому скорость движения прессового поршня должна быть либо постоянной менее 0,5 м/с, либо должно быть равноускоренное движение прессового поршня с приближением скорости к максимально возможному значению для данной машины ЛПД.

Третья фаза - заполнение полости пресс-формы. На этом этапе скорость прессового поршня задаётся максимально возможной для данной машины ЛПД. Для современных машин ЛПД эта скорость составляет 3-7 м/с. Такие скорости прессового поршня необходимы для получения качественных тонкостенных отливок [41]. Расплав, поступая в полость пресс-формы через элементы литниковой системы может двигаться тремя различными потоками: ламинарным, турбулентным и дисперсным [42]. Ламинарное движение потока расплава возможно организовать только для толстостенных отливок, для тонкостенных отливок такой режим создать не получится. Турбулентное движение потока расплава желательно избегать, т.к. при этом происходит чрезмерный захват воздуха, который останется в отливке, что с высокой долей вероятности приведёт к браку в отливке. Хотя полностью исключить турбулентное движение потока в ряде случаев может быть проблематично. Дисперсный режим движения потока расплава характеризуется высокими скоростями и более подходит для получения тонкостенных отливок. При этом, ряд исследований [43] допускает возможность получения качественных отливок при комбинированном характере движения потока расплава, а именно, турбулентно-дисперсный. На рисунке 1.1.2 представлена диаграмма, на которой показаны области, характерные для ламинарного, турбулентного и дисперсного режимов движения потока расплава, в зависимости от скорости потока и от толщины питателя $\delta_{пит}$ [43].

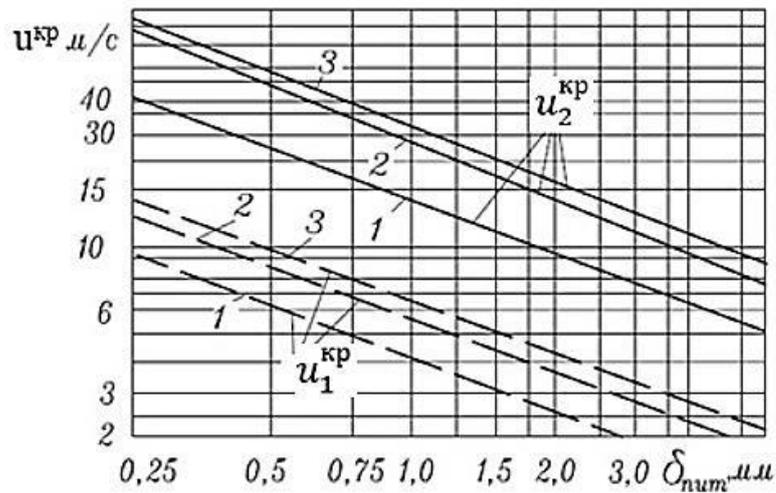


Рисунок 1.1.2 – Критические скорости потока жидких сплавов ($u^{кр}$) при различной толщине питателей $\delta_{пит}$

На рисунке 1.1.2 цифрами обозначены: 1 – Zn-сплавы; 2 – Al-сплавы; 3 – Mg-сплавы. В соответствии с рисунком 1.1.2 можно выделить следующие три области с разным режимом течения расплава в каналах (камере прессования и пресс-форме):

$u < u_1^{кр}$ – ламинарный режим;

$u_1^{кр} < u < u_2^{кр}$ – турбулентный режим;

$u > u_2^{кр}$ – дисперсный режим.

Четвёртая фаза - подпрессовка расплава. К началу этой фазы расплав полностью заполняет все каналы пресс-формы и движение прессового поршня прекращается. При этом, создаётся максимально возможное усилие со стороны прессового поршня на расплав, для компенсации литейной усадки и для сжатия пузырьков воздуха в отливке до микро-размеров.

Пятая фаза - выталкивание пресс-остатка из камеры прессования. После кристаллизации отливки и охлаждения до температуры выбивки, пресс-форма раскрывается. При этом, прессовый поршень одновременно с раскрытием пресс-формы начинает движение в направлении открытия пресс-формы для извлечения пресс-остатка из камеры прессования.

Шестая фаза - возврат прессового поршня в исходное положение. После раскрытия пресс-формы происходит выталкивание и извлечение отливки из

подвижной полуформы. Далее происходит смазка пресс-формы и выдвинутого пресс-поршня. После чего прессовый поршень возвращается в исходное положение, пресс-форма закрывается и цикл литья повторяется.

Машины ЛПД, производимые в 1950-ых – 1960-ых годах, с горизонтальной холодной камерой прессования имели возможности по созданию усилий прессования и запирания на уровне современных машин ЛПД. Однако, максимальная скорость холостого хода прессового поршня существенно отличалась в меньшую сторону и составляла 1-3 м/с. В качестве примера можно рассмотреть работу прессового механизма машины ЛПД 5А12, производства 1968 г. Параметры машины: усилие запирания - 6,3 МН, усилие прессования - 0,63 МН, максимальная скорость холостого хода прессового поршня - 0,7 м/с.

На рисунке 1.1.3 приведена упрощённая схема гидропривода прессового механизма машины 5А12 [43].

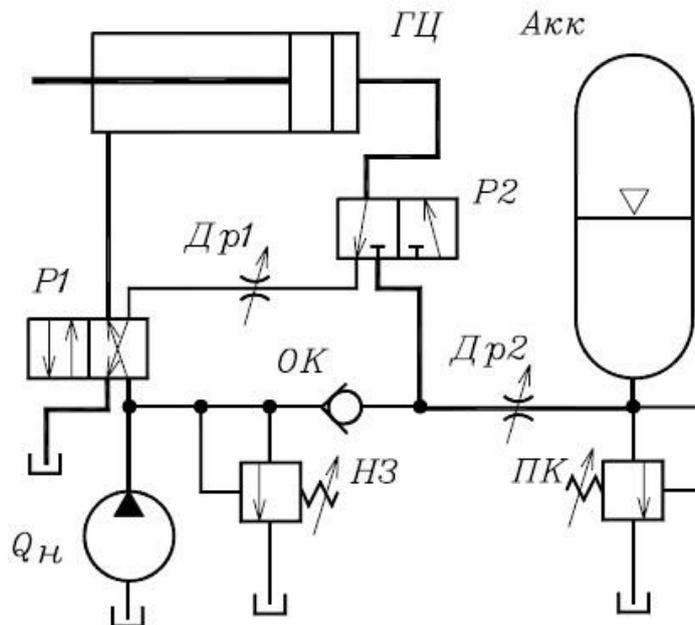


Рисунок 1.1.3 – Схема гидропривода прессового механизма машины 5А12

На рисунке 1.1.4 представлена осциллограмма работы прессового механизма машины 5А12 [43].

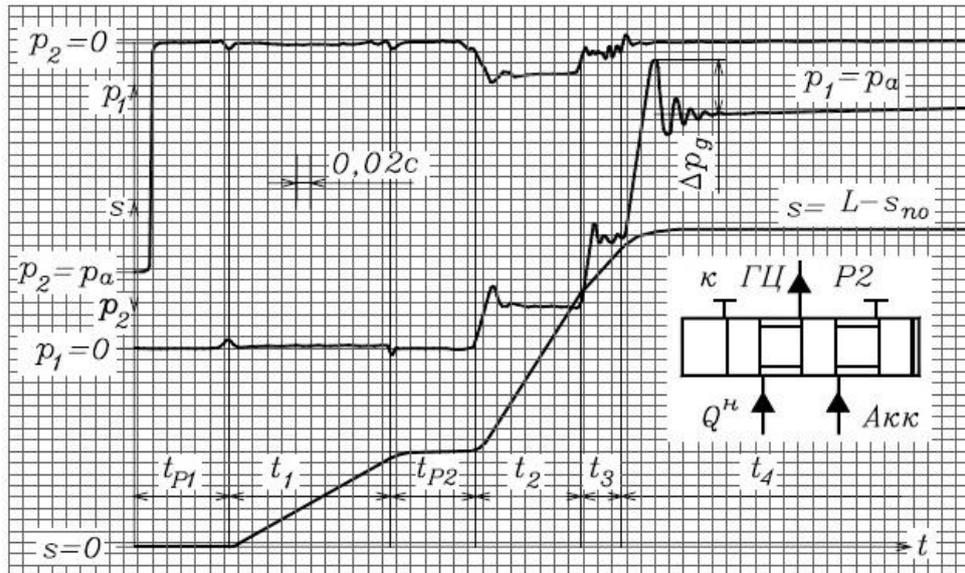


Рисунок 1.1.4 – Осциллограмма работы прессового механизма машины 5А12

На рисунке 1.1.4 обозначены: s - перемещение прессового поршня; p_1 - давление в нештоковой полости гидроцилиндра; p_2 - давление в штоковой полости гидроцилиндра; p_a - давление в аккумуляторе; Δp_g - пик динамического давления (гидроудар); t_1 - время фазы перекрытия заливочного окна; t_2 - время фазы сбора расплава в камере прессования; t_3 - время фазы заполнения расплавом полости пресс-формы; t_4 - время фазы подпрессовки; t_{P1} - время срабатывания и переключения распределителя P1; t_{P2} - время срабатывания и переключения распределителя P2.

В машинах ЛПД, аналогичных машине 5А12, в качестве распределителей использовались распределители золотникового типа с малым проходным сечением. Что приводило к большим задержкам во времени срабатывания (величина t_{P1} и t_{P2} на рисунке 1.1.4) и к большим гидравлическим потерям. Что в совокупности не давало возможности развить прессовому поршню скорости более 3 м/с. В конструкциях более современных машин ЛПД золотниковые распределители были заменены на распределители клапанного типа, с большими проходными сечениями каналов, что позволило снизить гидравлические потери и время открытия клапанов. В итоге современные машины ЛПД [44] позволяют достигать максимальной

скорости прессового поршня до 5-7 м/с, что важно для получения тонкостенных отливок [45].

1.1.2. Потери перегрева расплава в технологическом процессе литья под давлением

При проектировании технологических процессов литья отливок под давлением нужно, прежде всего, учитывать тот факт, что одним из главных факторов, влияющим на качество литой заготовки, является тепловой процесс ее формирования. Параметризация же остальных условий, включающих гидродинамику процесса, выбор положения отливки в форме, мест подвода расплава к ней, тип ЛС и др. должны стремиться к созданию благоприятных условий для теплового режима формирования фасонной отливки.

Помимо фаз работы машины ЛПД необходимо выделить этапы технологического процесса подачи расплава к машине ЛПД, которые предшествуют первой фазе работы машины ЛПД, но влияние которых необходимо учитывать при разработке технологии изготовления отливок, в частности, для расчета температуры заливки расплава. Это этапы: зачерпывание ковшем расплава из раздаточной печи, заливка расплава из ковша в камеру прессования машины ЛПД. Совместно с дальнейшими фазами работы машины ЛПД эти этапы будут суммарно составлять систему теплообмена между расплавом и пресс-формой/машиной ЛПД.

Течение расплава в полости литейной формы описывается системой уравнений, включающей уравнения Бернулли (или Навье - Стокса) и сплошности [46- 49]. Этот метод способствовал развитию исследований процессов литейной гидравлики и расчетов рациональных режимов заполнения форм расплавом.

Начальный этап теплообмена в системе расплав - среда связан с заполнением сплавом заливочного ковша из раздаточной печи. При этом известно, что минимально-возможная величина температуры заливки способствует получению качественного литого изделия. Что бы достичь минимального перегрева заливки

расплава, следует на всем пути его перемещения от раздаточной печи до пресс-формы и в ее полости, обеспечить минимальные тепловые потери расплава. Для удобства оценки тепловых потерь ΔT остановимся на следующих основных этапах охлаждения расплава при использовании машин с горизонтальной камерой прессования: 1) охлаждение расплава до заливки в камеру прессования $\Delta T_{\text{КОВШ}}$; 2) охлаждение расплава в камере прессования до начала движения прессового поршня $\Delta T_{\text{КП}}$; 3) охлаждение расплава при заполнении каналов литниковой системы $\Delta T_{\text{ЛС}}$; 4) охлаждение расплава в полости отливки $\Delta T_{\text{отл}}$.

$$\Delta T = \Delta T_{\text{КОВШ}} + \Delta T_{\text{КП}} + \Delta T_{\text{ЛС}} + \Delta T_{\text{отл}} \quad (1.1.1)$$

Первый этап охлаждения алюминиевого расплава связан с перемещением его из раздаточной печи в камеру прессования. Подача расплава, а следовательно, и тепловые потери, зависят от режима работы и конструкции применяемого для заливки устройства.

Наиболее часто для ручного и для автоматизированного режимов используют нагретый до температуры близкой к температуре заливаемого расплава разливочный ковшик – ложку, на внутреннюю поверхность которого предварительно наносится теплоизоляционная краска. Т.к. свободное охлаждение расплава в данном случае характеризуется относительно малой интенсивностью, возможно использовать известную формулу [50], позволяющую рассчитать его температуру в разливочном ковше в зависимости от времени $\tau_{\text{к}}$.

$$T_{\text{рк}} = T_{\text{нк}} - \frac{\alpha_c \cdot (T_{\text{нк}} - T_c) \cdot F_{\text{по}}}{G_o \cdot c'_1 + G_{\text{к}} \cdot c_{\text{к}}} \cdot \tau_{\text{к}} \quad (1.1.2)$$

где: α_c – коэффициент теплообмена на поверхностях охлаждения расплава и ковша; $F_{\text{по}}$ – площадь поверхности охлаждения; G_o и $G_{\text{к}}$ – массы расплава и ковша; $\tau_{\text{к}}$ – время нахождения расплава в ковше; c'_1 , $c_{\text{к}}$ – удельные теплоемкости расплава и материала ковша соответственно; $T_{\text{нк}}$, $T_{\text{рк}}$ – начальная и расчетная температуры расплава в ковше; T_c – температура окружающей среды.

Соответственно на основании (1.1.2) потери перегрева за время нахождения расплава в ковше τ_k составят:

$$\Delta T_k = \frac{\alpha_c \cdot (T_{нк} - T_c) \cdot F_{по}}{G_o \cdot c'_1 + G_k \cdot c_k} \cdot \tau_k \quad (1.1.3)$$

Второй этап по потере перегрева расплава $\Delta T_{кп}$ связан с охлаждением его до температуры $T_{ркп}$ перед началом движения поршня в камере прессования, куда он попадает из разливочного ковша. Время его охлаждения $\tau_{кп}$ лимитируется технологическим процессом и будем считать, что это время известно, или по крайней мере находится в известных ограниченных временных рамках. Расчет охлаждения расплава в смазанной камере прессования можно осуществить по формуле, аналогичной (1.1.2), т.е.:

$$T_{ркп} = T_{рк} - \frac{k_T \cdot (T_{рк} - T_{кп}) \cdot F_{ркп}}{G_o \cdot c'_1} \cdot \tau_{нкп} \quad (1.1.4)$$

где: $k_T = \frac{\lambda_{см}}{X_{см}}$ – коэффициент теплопередачи через слой смазки и окислов теплопроводностью $\lambda_{см}$ и толщиной $X_{см}$, находящихся на внутренней поверхности наполнительного стакана; $F_{ркп}$ – площадь поверхности контакта расплава и и камеры прессования; $T_{нкп}$ – начальная температура расплава в камере прессования; $T_{рк} = T_{нк} - \Delta T_k$.

В результате итоговое уравнение для расчета потерь перегрева расплава на втором этапе будет иметь следующий вид:

$$\Delta T_{кп} = \frac{\lambda_{см}}{X_{см}} \cdot \frac{(T_{рк} - T_{кп}) \cdot F_{ркп}}{G_o \cdot c'_1} \cdot \tau_{кп} \quad (1.1.5)$$

Начало третьего этапа связано с перемещение расплава поршнем в камере прессования и заканчивается на границе с пресс-формой. Четвертый этап так же включает дальнейшее движение расплава по каналам пресс-формы до полного их заполнения. Однако, необходимо помнить, что этому движению сопутствует трение [51, 52], которое, с одной стороны, противодействует движению струи, стремясь замедлить это перемещение, увеличить время ее движения на

рассматриваемом отрезке пути и, соответственно при этом, дополнительно понижая температуру расплава, с другой стороны – выделяется в перемещающемся расплаве теплота трения, способствующая сохранению перегрева в нем. Гидродинамические сопротивления в сложных лабиринтных каналах формы и разных проходных сечениях часто достаточно значительны по величине, а работа сил трения $A_{\text{тр}}$ превращается в теплоту $Q_{\text{тр}}$, которая дополнительно подогревает струю расплава на величину $\Delta T_{\text{тр}}$ [47- 49].

$$Q_{\text{тр}} = A \cdot A_{\text{тр}} \quad (1.1.6)$$

где: $A = 0,239$ – термический коэффициент работы, кал/Дж;

$$A_{\text{тр}} = P_{\text{тр}} \cdot L_{\text{к}} \quad (1.1.7)$$

$P_{\text{тр}}$ – сила трения расплава о стенки проходного канала; $L_{\text{к}}$ – длина рассматриваемого участка (например, путь движения расплава на третьем этапе, или – один из участков протяженной отливки сложной конфигурации).

Количество теплоты $Q_{\text{тр}}$, идущее на подогрев расплава так же равно:

$$Q_{\text{тр}} = V'_1 \cdot \rho'_1 \cdot c'_1 \cdot \Delta T_{\text{тр}} \quad (1.1.8)$$

где: V'_1 - объем расплава; ρ'_1 - плотность расплава сплава; $\Delta T_{\text{тр}}$ – повышение температуры расплава из-за сил трения.

С учетом формул (1.1.6) - (1.1.8) запишем:

$$\Delta T_{\text{тр}} = \frac{A \cdot P_{\text{тр}} \cdot L_{\text{к}}}{V'_1 \cdot \rho'_1 \cdot c'_1} \quad (1.1.9)$$

Силу трения расплава о стенки проходного канала можно определить из выражения (1.1.10) [47- 49]:

$$P_{\text{тр}} = F_{\text{пск}} \cdot \rho'_1 \cdot (\xi_{\text{сд}} + \xi_{\text{мс}}) \cdot \frac{u_{\text{к}}^2}{2g} \quad (1.1.10)$$

где: $F_{\text{пск}}$ - площадь поперечного сечения проходного канала; $\zeta_{\text{сд}}$ - сопротивление на трение расплава по длине канала; $\xi_{\text{мс}}$ - приведенный суммарный коэффициент сопротивления за счет изменения геометрии канала (местные сопротивления в канале); $u_{\text{к}}$ - средняя скорость течения расплава в канале; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

Сопротивление на трение расплава по длине канала равно [47- 49]:

$$\zeta_{\text{сд}} = \lambda_{Re} \cdot \delta_{\text{пск}}^2 \cdot L_{\text{к}} / D_{\text{эк}} \quad (1.1.11)$$

где: λ_{Re} – коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от величины значения критерия Рейнольдса ($Re = u_{\text{к}} \cdot D_{\text{эк}} \cdot \rho' / \mu$; $D_{\text{эк}}$ - гидравлический (эквивалентный) диаметр проходного канала, ($D_{\text{эк}} = 4 S_{\text{стр}} / P_{\text{стр}}$; $S_{\text{стр}}$; $P_{\text{стр}}$ – смоченные поперечная площадь и периметр струи расплава, проходящей через канал; $\mu' / 1$ – коэффициент динамической вязкости расплава сплава; $\delta_{\text{пск}} = \frac{f_{\text{стк}}}{S_{\text{стр}}}$; $f_{\text{стк}}$ – площадь поперечного сечения наполнительного стакана.

Сумма местных сопротивлений в канале определяется из выражения [47- 49]:

$$\xi_{\text{мс}} = \sum_{i=1}^m \xi'_{\text{мс}i} \cdot \left(\frac{f_{\text{стк}}}{S_{\text{стр}i}} \right)^2 \quad (1.1.12)$$

где: $\xi'_{\text{мс}i}$ - коэффициент сопротивления, соответствующий виду местного сопротивления; m – количество местных сопротивлений на пути движения расплава; i – текущий канал.

Таким образом, рекомендации и методики по расчету первых трех слагаемых в уравнении (1.1.1) наработаны, при этом четвертое слагаемое уравнения – потери перегрева при заполнении полости отливки не учитывалось. Т.е. считалось, что если температура расплава на выходе из питателя выше температуры ликвидуса, то полость отливки будет заполнена [44, 5]. Это утверждение не вызывает сомнений при заполнении небольших отливок простой формы. Тогда как для заполнения

тонкостенных, особенно тонкостенных протяженных отливок, учет потерь перегрева расплава при движении по таким каналам может оказаться критичным.

1.2. Литниковые системы отливок при литье под давлением

В зависимости от типа машин ЛПД, конфигурация ЛС для литья отливок на разных машинах будет отличаться. Связано это, в первую очередь, с различием в конструкции узлов прессования машин ЛПД, а, во вторую очередь, с узлом соединения пресс-формы с машиной ЛПД. При этом, расчет параметров ЛС от типа машин ЛПД не зависит.

1.2.1. Существующая классификация литниковых систем при литье под давлением

В общей технологии литья широко применяется классификация ЛС, в частности, при литье в песчаные формы. Например, верхняя ЛС, нижняя ЛС, дождевая ЛС, ярусная ЛС и т.д. Это позволяет начинающему конструктору или технологу, при разработке технологии изготовления отливки, делать выбор из уже существующих ЛС, а не каждый раз стараться придумать что-то новое. Помимо этого, классификация ЛС позволяет специалистам в литейной области общаться «на одном языке», называя краткое название разновидности ЛС, чтобы понять ее общую конфигурацию.

Как известно, при ЛПД классификация ЛС учитывает положение питателя или камеры прессования по отношению к отливке. Выделяют три разновидности ЛС: прямая, внутренняя и внешняя [3, 4, 57].

1. При прямой ЛС отсутствует подводный канал и питатель, а камера прессования примыкает непосредственно к телу отливки. Такая ЛС может применяться только для одногнездных пресс-форм на машинах с вертикальной холодной

или горячей камерой прессования. Пример прямой ЛС показан на рисунке 1.2.1, где: 1 – отливка, 2 – литниковый ход.

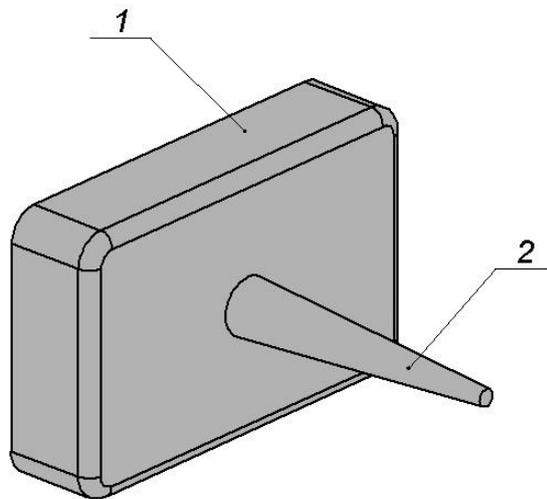


Рисунок 1.2.1 – Пример прямой литниковой системы

2. Внутренняя ЛС подходит для отливок с большим внутренним отверстием, в котором возможно расположить элементы ЛС, с целью экономии, для уменьшения габаритов пресс-формы. Эта разновидность ЛС также подходит только для одногнездных форм. Но, применяться может на любых машинах ЛПД. Пример внутренней ЛС показан на рисунке 1.2.2, где: 1 – отливка, 2 – питатель, 3 – подводящий канал, 4 – пресс-остаток.

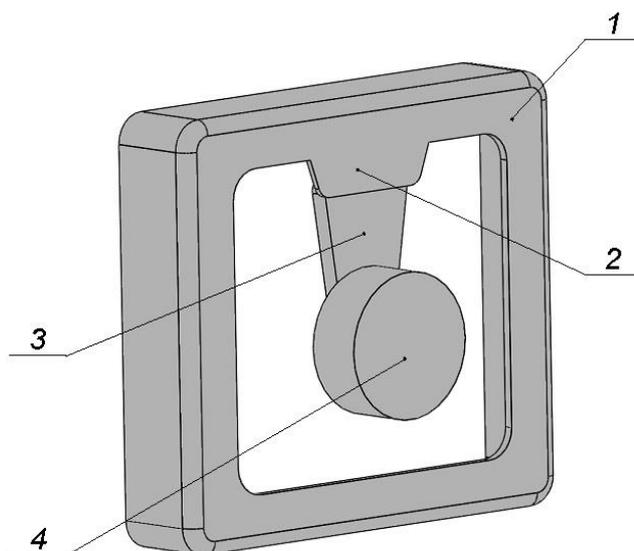


Рисунок 1.2.2 – Пример внутренней литниковой системы

3. Внешняя ЛС является наиболее универсальной. Она подходит как для одногнездных, так и для многогнездных пресс-форм. Такая ЛС может применяться на любых машинах ЛПД. Для внешней ЛС не будет играть важного значения конфигурация отливки, т.к. для данной ЛС подводящий канал и питатель можно спроектировать для подвода расплава именно к конкретному месту в отливке. Пример внешней ЛС показан на рисунке 1.2.3, где: 1 – отливка, 2 – питатель, 3 – подводящий канал, 4 – пресс-остаток.

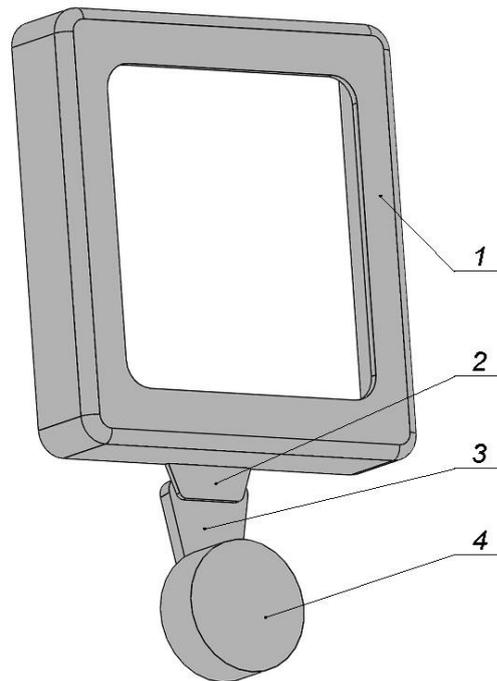
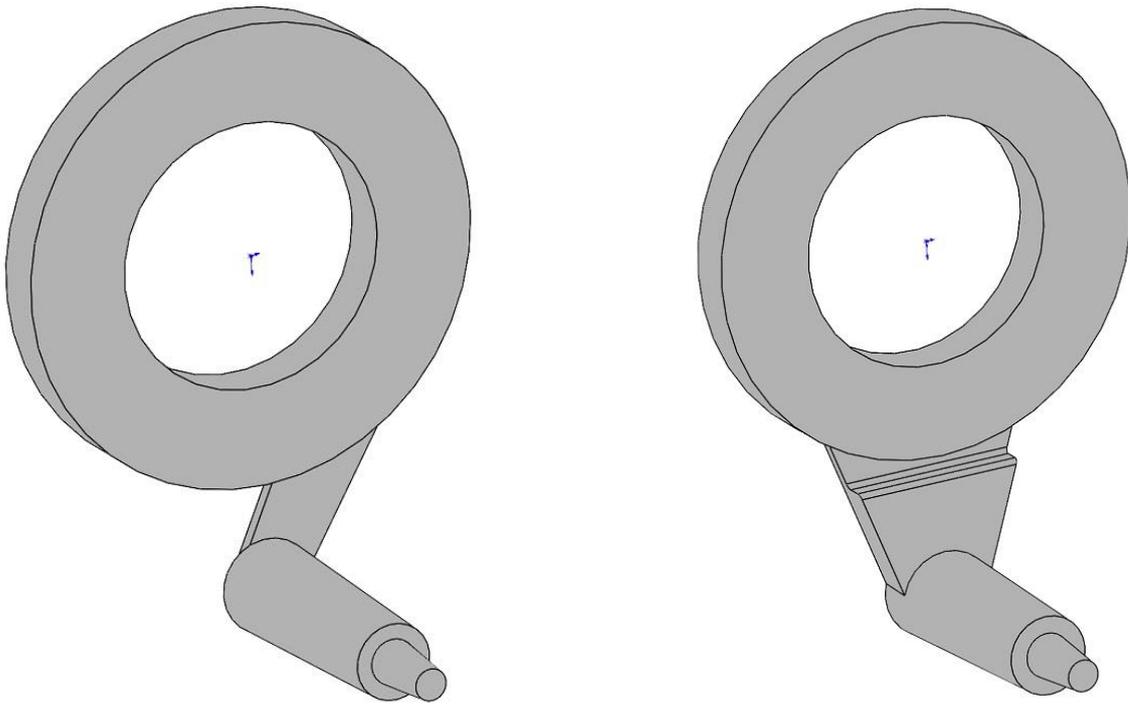


Рисунок 1.2.3 – Пример внешней литниковой системы

Также широко известны рекомендации по месту подвода питателя к отливке, в зависимости от ее конфигурации, на примере типовых отливок для ЛПД. Но, в данных рекомендациях рассматриваются оптимальные и неудачные варианты подвода питателя к различным отливкам, с точки зрения минимизации образования литейных дефектов. Однако, элементы ЛС для разных отливок выглядят практически идентично – пресс-остаток, характерный для машин ЛПД с холодной вертикальной камерой прессования, одинаковый подводящий канал и один или несколько питателей [3, 4, 57]. Одна из рекомендуемых схем подвода расплава к отливкам различной конфигурации [44] приведена на рисунке 1.2.4.



правильно

не правильно

Рисунок 1.2.4 – Схемы подвода питателя к отливкам различной конфигурации

Как уже было отмечено, наиболее универсальной и распространенной для ЛПД на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования является внешняя ЛС. Поэтому элементы ЛС для данного вида ЛС будут отличаться от тех, которая приведена на рисунке 1.2.4., т.к. эта конфигурация ЛС характерна для машин ЛПД с холодной вертикальной и горячей камерой прессования. При этом, сами элементы ЛС для описанных выше трех видов ЛС классификации не подвергались.

Существуют рекомендации по форме элементов ЛС в поперечном сечении. Так, питатели рекомендуют делать в поперечном сечении в виде прямоугольника, а подводящие каналы – в форме трапеций. Но, для разных отливок как питатели, так и подводящие каналы могут иметь совершенно различные длины и геометрические формы. Для каких-то отливок питатели могут быть в форме прямоугольника, для других отливок – в форме сектора. Так и подводящие каналы могут быть для одних отливок в виде вертикальных или горизонтальных прямоугольных каналов, а для других отливок – дугообразными или быть в виде сложных кривых.

Отсутствие единой классификации форм элементов ЛС для ЛПД, с одной стороны, создает некий «вакуум» для начинающих конструкторов и технологов, т.к. нет доступной базы для выбора одной из стандартных конфигураций элементов ЛС, при разработке технологии изготовления новой отливки. А с другой стороны, возникает сложность в кратком описании различных ЛС для отливок разной конфигурации.

1.2.2. Существующие методики расчета литниковых систем при литье под давлением

На машинах с холодной горизонтальной камерой прессования в большинстве случаев применяется внешняя ЛС, которая состоит из следующих основных элементов: питатель, подводящий канал (коллектор), пресс-остаток. Пример отливки с типовой ЛС показан на рисунке 1.2.5.

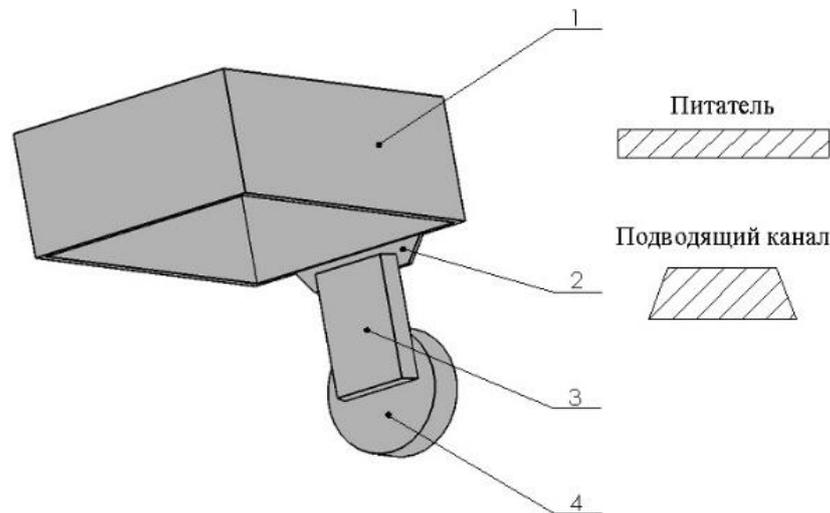


Рисунок 1.2.5 – Пример типовой литниковой системы

На рисунке 1.2.5 цифрами обозначены: 1 - отливка, 2 - питатель, 3 - подводящий канал, 4 - пресс-остаток.

Здесь и далее отливка показана условно, без литейных уклонов, радиусов скруглений и пр. В большинстве случаев питатель в сечении проектируют в виде прямоугольника, а подводящий канал - в виде трапеции.

К ЛС предъявляется целый ряд требований, выполнение которых должно обеспечить получение бездефектных отливок. Основное требование к ЛС – она должна обеспечить заполнение полости пресс-формы жидким расплавом без образования в отливке газовых дефектов, при этом оказывая минимальные негативные воздействия на пресс-форму [53 - 55].

Выполнение именно этого требования лежит в основе большинства общепринятых аналитических методик расчета ЛС [56 - 59, 5].

В этих методиках принцип расчёта основан на определении времени заполнения полости пресс-формы и скорости впуска расплава в питателе, исходя из которых, находится площадь поперечного сечения питателя. После определения площади поперечного сечения питателя определяются площади остальных элементов ЛС.

Для нахождения требуемых величин в этих методиках используется ряд эмпирических коэффициентов, которые учитывают такие факторы, как материал отливки, давление прессования, толщина стенки отливки и конфигурация отливки.

Многолетний опыт применения этих методик позволил определить область рациональных значений расходных характеристик ЛС. Так, для исключения образования газовых дефектов в отливках, необходимо обеспечить дисперсное заполнение расплавом полости пресс-формы [5]. Для разных марок сплавов определены диапазоны скоростей впуска расплава в питателе, которые этот режим заполнения реализуют. В частности, для алюминиевых сплавов скорость впуска составляет порядка 30 – 60 м/с. Также есть рекомендации для соотношения толщины питателя и толщины стенки отливки: питатель должен быть по толщине 0,8 от толщины стенки отливки, но не более 3 мм.

Согласно [56, 43], по методике А.К. Белопухова расчёт литниковой системы для литья под давлением ведётся для нахождения площади сечения питателя из соотношения равенства расходов по формуле (1.2.1.)

$$f_{\text{пит}} = \frac{V_{\text{отл}}}{\tau_{\text{зап}} \cdot v_{\text{вп}}} \quad (1.2.1)$$

где: $V_{\text{отл}}$ – объем отливки; $v_{\text{вп}}$ – скорость расплава в питателе, определяется по формуле (1.2.2)

$$v_{\text{вп}} = 15 \cdot K_1 \cdot K_2 \quad (1.2.2)$$

K_1 – коэффициент, учитывающий конфигурацию отливки;

Значения коэффициентов K_1 и K_2 указаны в таблицах 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Коэффициент K_1

Тип отливки	K_1
Толстостенная простой конфигурации	0,75
Коробчатого сечения	1,00
Сложной конфигурации	1,50
Очень сложной конфигурации с тонкими рёбрами 0,5...0,8 мм	2,00

K_2 – коэффициент, учитывающий давление металла в форме.

Таблица 1.2 – Коэффициент K_2

Давление, МПа	K_2
До 20	2,50
20-40	2,00
40-60	1,75
60-80	1,50
80-100	1,25
Свыше 100	1,00

Рекомендуемое давление металла в форме p_m (МПа) принимается по таблице 1.3, в зависимости от толщины отливки и типа сплава.

Таблица 1.3 – Давление металла в форме

Сплавы	Отливки с толщиной стенки					
	до 3,0 мм			св. 3,0 мм		
	простые	сложные	особо сложные	простые	сложные	особо сложные
Цинковые	30	40	45	55	60	75
Алюминиевые	35	45	50	60	65	80
Магниевые	40	55	60	70	80	100
Медные	45	65	70	80	95	130

$\tau_{\text{зап}}$ - время заполнения пресс-формы высчитывается по формуле (1.2.3)

$$\tau_{\text{зап}} = 0,06 \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (1.2.3)$$

где: K_3 — коэффициент, который учитывает вид сплава, для алюминия;

Значения коэффициентов K_3 и K_4 указаны в таблицах 1.4 и 1.5.

Таблица 1.4 – Коэффициент K_3

Сплавы	K_3
Свинцово-оловянистые	1,10
Цинковые	1,00
Алюминиевые	0,90
Магниевые	0,85
Медные	0,75
Сталь и чугун	0,50

K_4 — коэффициент, который учитывает толщину стенки данной отливки.

Таблица 1.5 – Коэффициент K_4

Средняя толщина стенки, мм	K_4
До 1	0,50
1-2	0,75
2-4	1,00
4-6	1,15

6-9	1,30
Св.9	1,50

Формулы (1.2.2) и (1.2.3) для расчета значений коэффициентов K_1-K_4 , получены на основе обобщения большого объема экспериментальных данных.

По методике Н.А. Шубина произведение $v_{вп}$ и $\tau_{зап}$ выражено через коэффициент K , учитывающий конфигурацию отливки и тип сплава. Данная методика имеет ограничение в применении: масса отливки до 5 кг, толщина стенки до 5 мм.

$$K = \tau_{зап} \cdot v_{вп} \quad (1.2.4)$$

Также существует ряд методик определения площади сечения питателя $f_{пит}$ по номограммам. В номограммах учитывается масса или объём отливки, тип сплава, толщина стенки и скорость впуска. Например, номограмма, построенная Дж. Гербером для отливок из эвтектического алюминиевого сплава, толщиной стенки 3-3,5 мм, [43].

После определения площади сечения питателя $f_{пит}$ рассчитывается площадь сечения подводящего канала (коллектора) $F_{пк}$.

$$F_{пк} = (1,2 \dots 1,5) \cdot f_{пит} \quad (1.2.5)$$

Рекомендованные пропорции геометрических размеров питателей и подводящих каналов, согласно [3, 43], следующие.

$H_{пк}$ - высота подводящего канала

$$H_{пк} = 0,77 \cdot \sqrt{F_{пк}} \quad (1.2.6)$$

$B_{пк}$ - ширина подводящего канала.

$$B_{пк} = \frac{F_{пк}}{H_{пк}} \quad (1.2.7)$$

$\delta_{пит}$ - высота питателя, согласно [3, 43], рекомендуется до 0,8 от толщины отливки.

$b_{\text{пит}}$ - ширина питателя.

$$b_{\text{пит}} = \frac{f_{\text{пит}}}{\delta_{\text{пит}}} \quad (1.2.8)$$

После расчёта площадей поперечного сечения элементов литниковой системы, согласно [5], необходимо провести для заданной отливки подбор машины литья под давлением по основному технологическому параметру - усилию запира-ния, которое обеспечит нераскрытие пресс-формы при запрессовке в неё расплава.

Условие нераскрытия пресс-формы при заливке можно сформулировать следующим образом:

$$P_3 > 1,2 \cdot P_M \quad (1.2.9)$$

P_3 - усилие запира-ния машины литья под давлением,

P_M - усилие, которое оказывает расплав при подпрессовке, на пресс-форму.

$$P_M = p_M \cdot F_0 \quad (1.2.10)$$

p_M - давление в металле при подпрессовке,

F_0 - площадь проекции отливки на плоскость разъёма пресс-формы.

Схематично процесс заливки расплава в пресс-форму и воздействие расплава на раскрытие пресс-формы показано на рисунке 1.2.6.

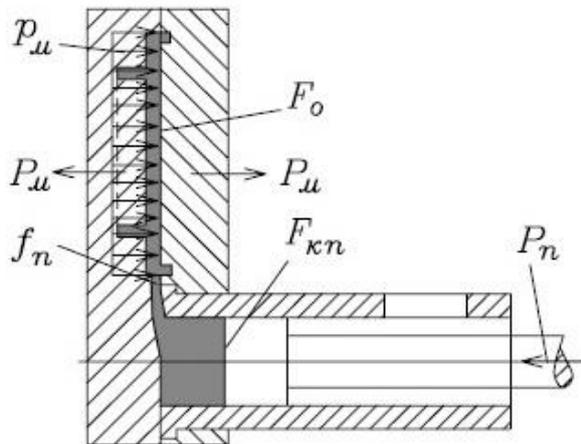


Рисунок 1.2.6 – Схема заливки расплава в пресс-форму

После подбора машины по усилию записания, возможно определить другие ключевые технологические параметры при литье под давлением, а именно усилие прессования $P_{\text{п}}$ и максимальную скорость прессового поршня v . Эти параметры являются характеристиками конкретной машины литья под давлением и указываются в технической документации на машину. Зная усилие прессования машины, возможно определить диаметр камеры прессования $D_{\text{кп}}$, который можно вычислить по известной формуле, зная площадь сечения прессового поршня $F_{\text{кп}}$. Рассчитанный диаметр камеры прессования округляется до ближайшего значения, стандартно изготавливаемого производителем машины ЛПД.

Площадь сечения прессового поршня вычисляется по формуле:

$$F_{\text{кп}} = \frac{P_{\text{п}}}{p_{\text{м}}} \quad (1.2.11)$$

Диаметр камеры прессования определяется по формуле:

$$D_{\text{кп}} = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\text{кп}}}{\pi}} \quad (1.2.12)$$

Финальным этапом расчёта является проверка технологической возможности машины ЛПД обеспечить расчётную скорость прессового поршня, которая рассчитывается по формуле (1.2.13) и сравнивается с паспортными данными машины ЛПД. В случае получения меньшего значения, необходимо увеличить диаметр камеры прессования.

$$v = v_{\text{вп}} \cdot \frac{f_{\text{пит}}}{F_{\text{кп}}} \quad (1.2.13)$$

Таким образом, алгоритм проектирования литниковой системы для отливок, изготавливаемых литьём под давлением, изложенный выше, подразумевает следующий порядок действий:



Рисунок 1.2.7 – Алгоритм расчёта литниковой системы

На отдельных этапах этого алгоритма используются следующие формулы:

1) Расчёт площади сечения питателя $f_{\text{пит}}$ по формуле (1.2.1)

- 2) Расчёт площади сечения подводящего канала $F_{ПК}$ по формуле (1.2.4)
- 3) Подбор машины ЛПД для данной отливки по усилию запираания P_3 , формула (1.2.8)
- 4) Расчёт диаметра камеры прессования $F_{КП}$ по формулам (1.2.10), (1.2.11)
- 5) Проверка обеспечения скорости прессового поршня v для данного диаметра камеры прессования по формуле (1.2.12)

К недостаткам рассмотренных методик можно отнести следующее:

- методики разработаны для укрупненных групп отливок, и не учитывают особенности конфигурации сложных по геометрии отливок, которые активно внедряются на производстве. Под сложной конфигурацией будем понимать, прежде всего, протяженность и тонкостенность отливки (длины 500 мм и более, толщины стенок 3 мм и менее, соотношение длины к ширине как 1 к 10 и более). Представителем таких отливок является, в частности, радиатор отопления;

- часть эмпирических коэффициентов получена на основе опыта эксплуатации машин ЛПД, созданных в середине 20-го века, и параметры этих машин существенно отличаются от параметров машин, разработанных в последние годы.

Еще один недостаток таких методик – необходимость назначения величины температуры заливки расплава, которая никак напрямую не связана с методикой расчета ЛС. Следовательно, после расчета ЛС, в настоящее время приходится использовать другие методики для расчета температуры заливки расплава, которая должна обеспечить (для уже разработанной ЛС) заполнение расплавом полости пресс-формы.

1.2.3. Применение методик расчета литниковых систем на практике

Обзорный анализ реально спроектированных пресс-форм, на которых производились отливки на ряде промышленных предприятиях РФ (ООО «РосАЛит», АО «Сантехпром», ПАО «ТМЗ» и др.), показал следующее. Для целого ряда отливок

размеры элементов ЛС значительно отличаются от тех, которые рекомендуются в методиках, рассмотренных в главе 1.2.2.

Несколько примеров спроектированных отливок с литниковой системой представлены на рисунках 1.2.8-1.2.10, а разница в площадях элементов реальных литниковых систем отливок и какими они должны были бы быть по расчёту по методике, изложенной в главе 1.2.2., сведены в таблицу 1.6.

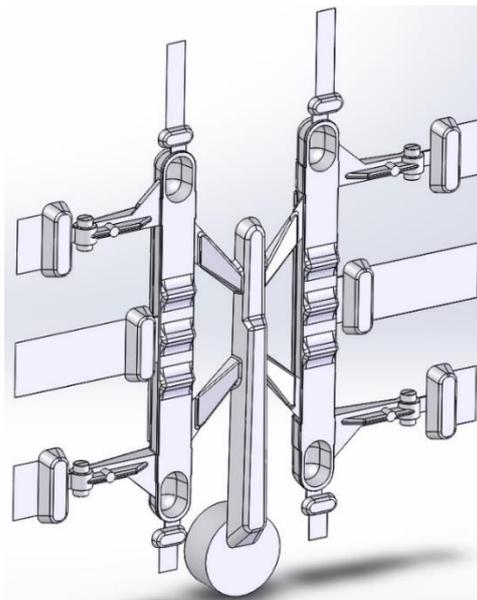


Рисунок 1.2.8 – Отливка «Ручка» с литниковой системой

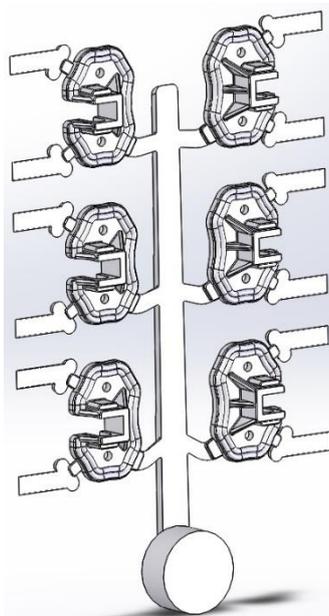


Рисунок 1.2.9 – Отливка «Кронштейн» с литниковой системой

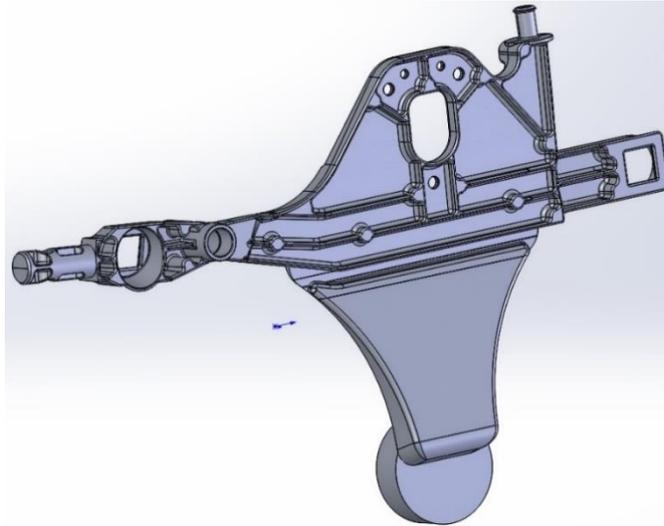


Рисунок 1.2.10 – Отливка «Корпус» с литниковой системой

Таблица 1.6 – Размеры элементов ЛС для отливок, изготавливаемых литьём под давлением

Название отливки	Фактическая площадь питателя, мм ²	Расчётная площадь питателя, мм ²	Фактическая площадь подводящего канала, мм ²	Расчётная площадь коллектора, мм ²
Ручка	66	47	120	70
Кронштейн	15	10	28	15
Корпус	208	96	200	144

Сравнив результаты, представленные в таблице 1.6, видно, что литниковые системы реальных пресс-форм проектировались с существенными отличиями от существующей методики расчёта. Таким образом, можно предположить, что конструкторы пресс-форм интуитивно, а также руководствуясь производственным опытом своих предприятий, проектировали размеры элементов литниковой системы существенно больше, чем предлагается по существующей методике.

Причины такого несоответствия неясны и в литературных источниках не отражены, что ставит перед исследователями задачу: найти этому объяснение и возможность корректировки существующих методик.

Стоит также отметить, что несоответствия по размерам элементов ЛС особенно заметны для сложных по конфигурации отливок.

1.3. Математические модели расчета тепловых потерь расплава при заполнении пресс-формы

Одно из главных требований при разработке (ЛС) для большинства способов литья – обеспечить минимальные потери перегрева при заполнении расплавом полости литейной формы, что дает возможность назначить минимально возможную температуру заливки. Хорошо известно, что чем ниже температура заливки, тем выше эксплуатационные свойства отливок [95, 96]. При литье под давлением (ЛПД) снижение температуры заливаемого расплава еще и существенно повышает эксплуатационный ресурс дорогостоящих пресс-форм [95-97].

Для автоматизированного решения задач по оптимизации конфигурации элементов ЛС при ЛПД с целью снижения тепловых потерь широко используется вычислительное моделирование [98]. При этом, нужно иметь в виду, что современные моделирующие системы предназначены для решения только прямых задач, мало связанных с собственно автоматизацией проектирования, т.е. в данном случае непосредственно не рассчитывают параметры ЛС и температуру заливки расплава. Системы моделирования позволяют производить оценку только выбранного и размеренного технологом варианта с минимальными затратами времени и средств по сравнению с экспериментальным или производственным опробованием, чтобы при необходимости внести изменения в предложенный вариант. Однако ввиду сложности технологического процесса ЛПД (прежде всего высокие скорости течения расплава, малая толщина стенок отливок), компьютерные вычисления могут занимать достаточно много времени, что приводит к неоправданно большим трудозатратам. Поэтому задачу нахождения потерь перегрева целесообразно решать в два этапа.

На первом этапе, используя различные аналитические методики решения прямых и обратных задач [3, 63], определяется значение температуры заливки. Затем, на втором этапе, достоверность этого значения температуры проверяется на основе машинного эксперимента, т.е. с помощью моделирования заполнения

расплавом полости литейной формы в одном из существующих пакетов программ (ПолигонСофт, LVMFlow, ProCAST, FLOW 3D и других) [99-112]. В результате при наличии надежной расчетной методики, позволяющей достоверно решать прямые и обратные задачи технологических параметров процессов литья фасонных заготовок, становится достаточным одного моделирующего эксперимента без дополнительной корректировки входных параметров.

При заполнении расплавом полости пресс-формы происходит интенсивный теплообмен между движущимся расплавом и стенками пресс-формы. Чтобы посчитать потери перегрева при заполнении расплавом полости конкретной пресс-формы, необходимо решить задачу, в которой учитывается как скорость движение расплава по ее каналам, так и теплообмен между расплавом и стенками пресс-формы. Для решения этой задачи на практике используют как алгоритмические, так и аналитические математические модели (ММ).

Алгоритмические математические модели обычно представляют собой системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают физические процессы, их механизмы (например, переноса тепла) и имеющие место быть в поставленной задаче. Данные модели решаются различными численными методами (в основном - конечных разностей МКР и конечных элементов МКЭ) в вышеуказанных пакетах программ.

В аналитических математических моделях сложные физические задачи упрощаются до уравнений, которые решаются напрямую, без применения численных методов. В результате при обоснованном упрощении сложных ММ для решения их аналитическими методами появляется возможность непосредственно рассчитать искомый технологический параметр. Примером такой модели, которая широко используется в теории литья [62-68], является модель малой интенсивности теплообмена между отливкой и литейной формой.

1.3.1. Алгоритмическая математическая модель

Из механики сплошной среды известно [69,70], что для описания течения сплошной среды (в нашем случае течения расплава по каналам пресс-формы), нам надо знать скорость расплава (3 ее компоненты), плотность расплава, давление в расплаве и его температуру. Итого, 6 неизвестных скалярных функций. Замкнутая система уравнений гидродинамики должна содержать столько же уравнений, сколько и неизвестных функций.

При описании течения расплава по каналам пресс-формы обычно принимают расплав как несжимаемую жидкость. В этом случае уравнение неразрывности (закон сохранения массы) запишется в виде:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1.3.1)$$

где: u_x , u_y и u_z – компоненты вектора скорости расплава, x , y , z - координаты.

Далее записываются уравнения движения. В общем случае, когда вектор скорости направлен произвольно, уравнения движения несжимаемой вязкой ньютоновской жидкости в проекциях на оси координат имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \eta \Delta u + g_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \eta \Delta v + g_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \eta \Delta w + g_z \end{aligned} \quad (1.3.2)$$

где: t – время; u , v , w – компоненты скорости по осям; ρ – плотность; p – давление; η – коэффициент динамической вязкости; g_x , g_y , g_z – компоненты ускорения свободного падения по осям.

Эти уравнения называются системой уравнений Навье-Стокса. Слева в этих уравнениях движения стоят ускорения, а справа – плотности поверхностных сил давления, вязких сил, и массовых сил.

Здесь Δ - оператор Лапласа, так:

$$\Delta u = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial u}{\partial x_i} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1.3.3)$$

Если теплофизические свойства движущегося расплава принять постоянными, то перенос тепла можно описать дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье (в Лагранжевой системе координат):

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1.3.4)$$

где: c - удельная теплоёмкость; λ – коэффициент теплопроводности.

Таким образом, представленные уравнения образуют замкнутую систему уравнений для математического описания нестационарных трехмерных течений и тепловых полей вязкой жидкости с постоянными свойствами.

Как видно из приведенных систем уравнений, такую сложную комплексную задачу решать без применения специальных математических методов (методов сеток) и программного обеспечения весьма затруднительно.

Кроме представленных уравнений, описывающих движение расплава с одновременным теплообменом, есть еще целый ряд физических процессов, которые необходимо учитывать при решении комплексной задачи получения бездефектных отливок при ЛПД.

Решения алгоритмических моделей для технологических процессов ЛПД реализовано в различных системах компьютерного моделирования. В дальнейшем для проведения численных экспериментов воспользуемся СКМ FLOW 3D, позволяющей получить наглядную и точную физическую картину процессов, происходящих в расплаве при заполнении сложных полостей пресс-формы можно получить в пакете программ FLOW 3D. Возможности данной программы по

моделированию литейных процессов проверены многолетним опытом ее использования на кафедре «Литейные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, что нашло отражение, например, в работах [38, 84, 113, 114]. Данные, полученные моделированием, неоднократно проверялись и подтверждались практическими опытами.

1.3.2. Аналитическая математическая модель

Одной из аналитических математических моделей решения задачи теплообмена между пресс-формой и движущимся потоком расплава, которая широко используется в теории формирования отливки, является модель малой интенсивности охлаждения отливки в форме.

Данная модель является упрощением дифференциального уравнения теплопроводности Фурье.

Так, если принять, что тепло передается только в одном направлении, трехмерная задача переходит в одномерную задачу:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1.3.5)$$

где: c - удельная теплоёмкость; ρ – плотность; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; t – время; x – координата.

Помножив части уравнения на -1 , и внося λ под дифференциал, получим:

$$-c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (1.3.6)$$

Умножаем обе части уравнения на dx :

$$-c\rho \frac{dT}{dt} dx = \frac{\partial q}{\partial x} dx \quad (1.3.7)$$

где: q – плотность теплового потока.

По определению, в правой части имеем дифференциал функции:

$$-c\rho \frac{dT}{dt} dx = dq \quad (1.3.8)$$

Интегрируем части уравнения с пределами по толщине отливки:

$$-c\rho \frac{dT}{dt} \int_0^{l_0} dx = \int_0^{l_0} dq \quad (1.3.9)$$

Получим

$$-c\rho l_0 \frac{dT}{dt} = q_{l_0} - q_0 \quad (1.3.10)$$

Значение $q_0 = 0$, так как температура на этой границе (центр отливки) равна максимуму, следовательно:

$$-c\rho l_0 \frac{dT}{dt} = q_{l_0} \quad (1.3.11)$$

Полученное уравнение есть дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для модели малой интенсивности охлаждения отливки.

В правой части значение плотности теплового потока q_{l_0} определяется в зависимости от типа коэффициента теплообмена. В теории литья все литейные формы условно делятся на два типа: массивные непрогреваемые формы, когда при теплообмене с расплавом происходит плотный контакт расплава с формой; и немассивная форма, прогреваемая по всему объёму, при этом контакт расплава происходит через слой краски [65].

Для массивных непрогреваемых форм, принимаются следующие допущения. Слой краски на границе контакта отливки с формой либо отсутствует, либо теплофизические свойства краски близки к свойствам формы, следовательно, в математической модели затвердевания расплава в форме слой краски можно не учитывать.

На границе контакта формы с окружающей средой плотность теплового потока равна нулю, так как форма является массивной и непрогреваемой.

Также принимаем допущение о том, что граница отливка-форма – контакт двух полу бесконечных тел. На границе контакта температура – постоянная величина.

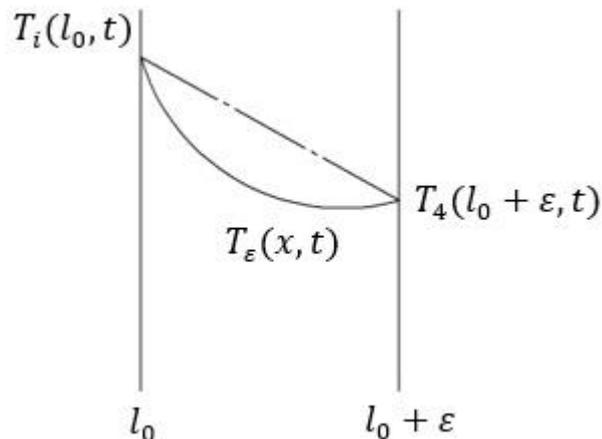
Тогда значение q_{l_0} берется из решения задачи о прогреве/охлаждении полу бесконечного тела:

$$q_{l_0} = \frac{b_\phi}{\sqrt{\pi t}} (T_{\text{зал}} - T_\phi) \quad (1.3.12)$$

где: b_ϕ – коэффициент тепловой аккумуляции формы; $T_{\text{зал}}$ – температура заливки; T_ϕ – температура формы.

Для форм, относящихся к немассивным и прогреваемым, допущения принимаются уже другие.

Свойства краски, наносимой на формообразующую поверхность, существенно отличаются от свойств формы. Поэтому пренебрегать слоем краски нельзя.



Но так как толщина слоя краски мала, то кривую изменения температуры по ее толщине можно аппроксимировать отрезком, рисунок 1.3.1.

Рисунок 1.3.1 - Распределение температуры по сечению слоя краски

На рисунке 1.3.1 показано температурное поле по сечению отливки $T_i(l_0, t)$; распределение температур по сечению формы $T_4(l_0 + \varepsilon, t)$ и краски $T_\varepsilon(x, t)$; l_0 и ε толщины отливки и краски соответственно.

С учетом аппроксимации, плотность теплового потока на границе контакта отливки с краской можно записать:

$$-\lambda_\varepsilon \frac{\partial T_\varepsilon(l_0, t)}{\partial x} = \lambda \frac{(T_i(l_0, t) - T_4(l_0 + \varepsilon, t))}{\varepsilon} \quad (1.3.13)$$

С учетом подстановки $\frac{\lambda}{\varepsilon} = \beta$, где: β – коэффициент тепловой активности кокильной краски (по Вейнику) [62], выражение для q_{l_0} примет вид:

$$q_{l_0} = \beta(T_i(l_0, t) - T_4(l_0, t)) \quad (1.3.14)$$

Таким образом, приведенная модель малой интенсивности охлаждения отливки в форме позволяет решать упрощенную задачу теплообмена между движущимся расплавом и заполняемой им пресс-формой, причем для двух различных типов коэффициента теплообмена: для $\frac{b_\phi}{\sqrt{\pi t}}$ (для краткости в дальнейшем будем в тексте обозначать его как b_ϕ) и для β .

В связи с этим, когда моделируется конкретный способ литья, необходимо, прежде всего, определить, какой тип коэффициента теплообмена следует применять для рассматриваемого способа литья. И в ряде случаев этот выбор совсем не очевиден и требуется проведение серии специальных натуральных и (или) вычислительных экспериментов.

1.4. Выводы по первой главе

1. Одним из основных технологических параметров при литье под давлением является температура заливки расплава, которая в большинстве существующих методик расчета литниковых систем напрямую не учитывается, а только косвенно через эмпирические коэффициенты.

2. В существующих методиках расчета литниковых систем для литья под давлением используются эмпирические зависимости, полученные для отливок,

разделенных на укрупненные группы. Классификация элементов литниковых систем для литья под давлением отсутствует.

3. Расчет потерь перегрева расплава, которые определяют величину температуры заливки, в существующих методиках ведется до момента поступления расплава в полость пресс-формы, оформляющую конфигурацию отливки. Потери перегрева расплава в полости отливки не учитываются.

4. Анализ производственного опыта проектирования пресс-форм для литья под давлением сложных по конфигурации отливок показал, что параметры элементов литниковых систем в ряде случаев существенно отличаются от расчетов по существующим методикам.

5. Для сокращения времени при расчете потерь перегрева расплава при заполнении полости пресс-формы используется методика, согласно которой расчет проводится в два этапа с использованием аналитических и алгоритмических математических моделей. Выбор вида моделей неочевиден и нуждается в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении.

2. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МЕТОДИК И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

2.1. Разработка классификации внешних литниковых систем для литья под давлением

Как было отмечено в главе 1.2.1., на данный момент существуют классификации вариантов ЛС для ЛПД, из которых фактически на практике используется только одна – внешняя ЛС. А для этой ЛС есть рекомендации только по форме поперечных сечений элементов ЛС и по месту подвода расплава к отливке. Однако, по геометрическим параметрам и форме основных элементов ЛС нет единого описания, т.е. отсутствует база стандартных элементов ЛС, из которой можно было бы выбрать подходящую комбинацию геометрии элементов ЛС для конкретной отливки.

Анализ производственного опыта ряда литейных предприятий РФ показал, что на практике могут использоваться различные питатели и подводящие каналы, в зависимости от конфигурации отливки. Обобщение этого практического опыта дает основания классифицировать основные элементы внешних литниковых систем следующим образом (рисунок 2.1.1). Представленная классификация не ограничена количеством типовых элементов и может быть расширена новыми предложенными их видами, как для питателей, так и для подводящих каналов.

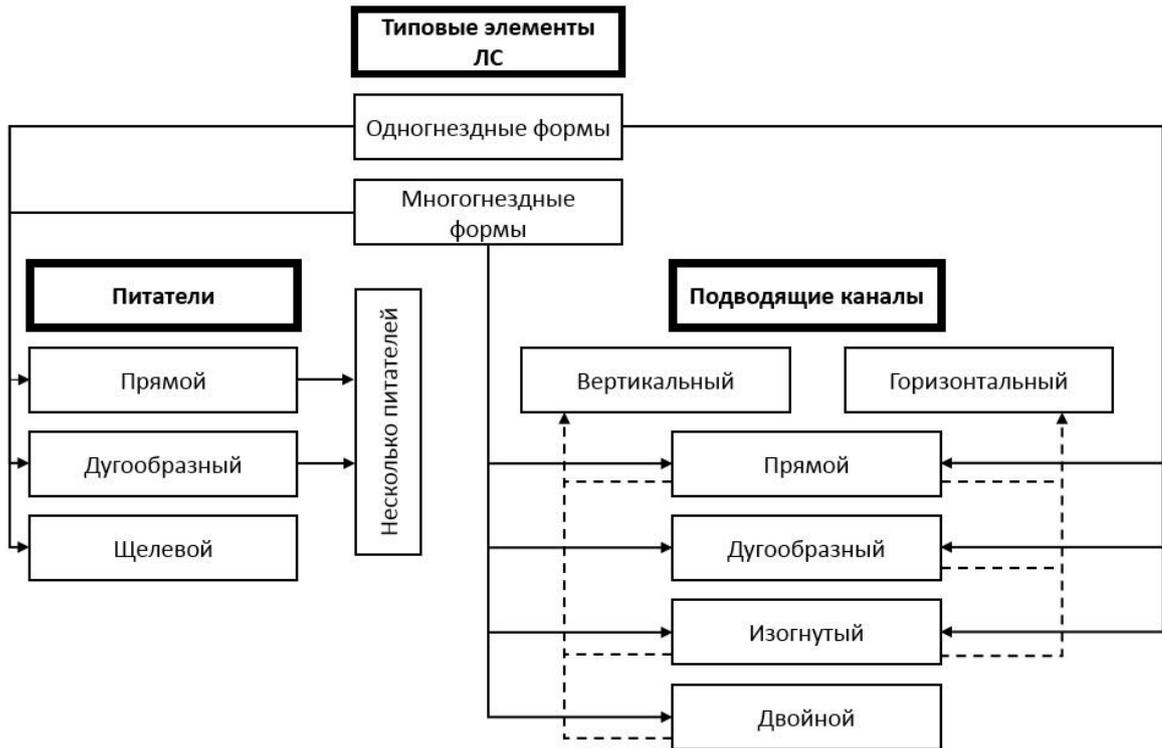


Рисунок 2.1.1 – Классификация типовых элементов ЛС

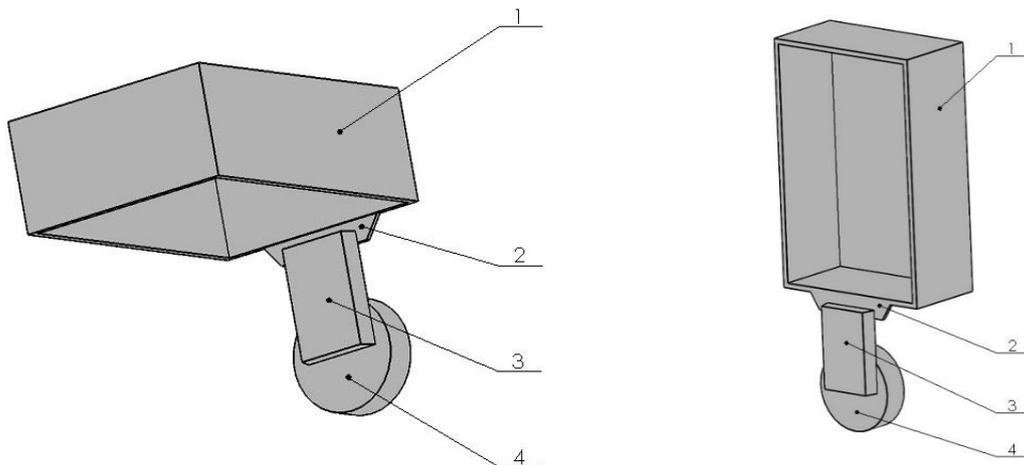
В соответствии с представленной классификацией рассматриваются одногнездные и многогнездные пресс-формы, подвод расплава в которых к отливкам осуществляется через подводящие каналы и питатели. На практике применяют два расположения подводящих каналов – вертикальное и горизонтальное. При этом геометрические образы подводящих каналов могут быть разными. В данном случае рассмотрены их четыре основных вида обозначенных, как прямой, дугообразный, изогнутый и двойной, а их расположение в пресс-форме (вертикальное или горизонтальное) выбирается в зависимости от особенностей технологии ЛПД для конкретного изделия. Питатели так же типизированы - прямой, дугообразный и щелевой. Если для идентификации литниковой системы принять в качестве начальной основы название подводящего канала и добавить к нему тип питателя, то ЛС будет конкретизирована. Например, ЛС с прямым вертикальным подводящим каналом и дугообразным питателем, или ЛС с прямым горизонтальным подводящим каналом и щелевым питателем и т.д. При наличии в одной литниковой системе разных геометрических образов типовых элементов будем считать такую ЛС комбинированной.

При проектировании литниковой системы на этапе выбора ее конструкции следует руководствоваться принципами предотвращения удара струи расплава из питателей о стенки пресс-формы под прямым углом и столкновений потоков расплава при заполнении полости формы. При этом следует обеспечить последовательное заполнение полости формы потоком расплава с вытеснением воздуха в сторону промывников и вентиляционных каналов. Выбор типа питателя от гнёздности формы не зависит, т.к. для каждой отливки в форме проектируется свой питатель. На тип питателя оказывает основное влияние конфигурация отливки. На всех рисунках в текущей главе цифрами обозначены: 1 – отливка, 2 – питатель, 3 – подводящий канал, 4 – пресс-остаток.

1) Разновидности питателей

1.1) Прямой питатель.

Прямой питатель представляет из себя параллелепипед, соединяющий подводящий канал с отливкой. Такой тип питателя подходит для отливок, которые имеют плоские поверхности, к которым может быть подведён питатель. Это наиболее распространённая разновидность питателей и подходит для большинства корпусных отливок, различных кронштейнов, крышек и других разновидностей отливок. Прямой питатель показан на рисунке 2.1.2.



а) Правильно

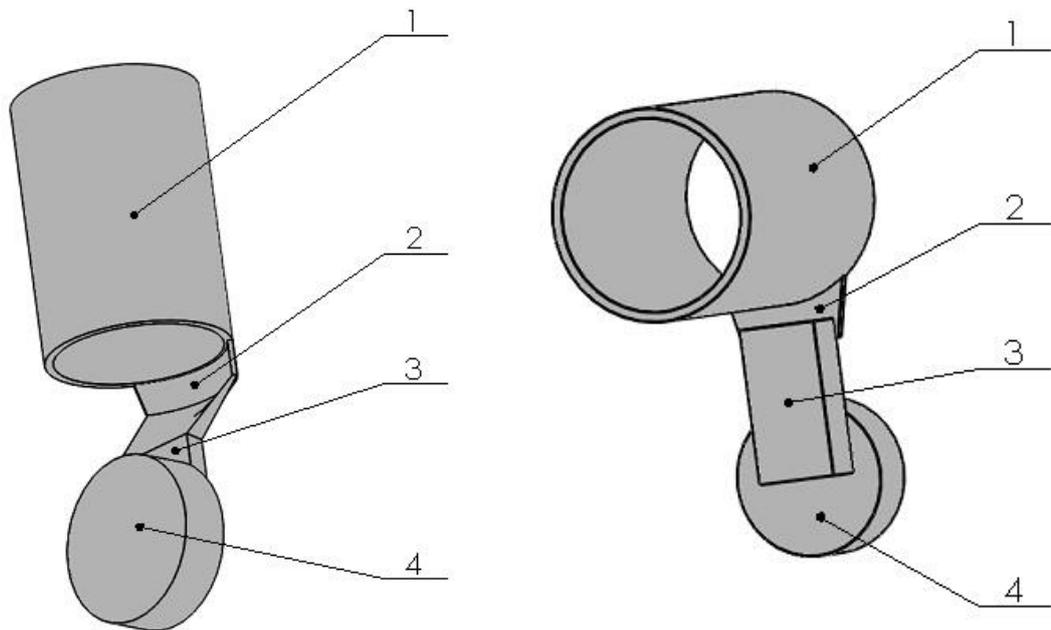
б) Не правильно

Рисунок 2.1.2 – Прямой питатель

Питатель надо подводить к стенке таким образом, чтобы поток расплава не ударялся сразу о стенку формы, а был направлен вдоль полости формы.

1.2) Дугообразный питатель.

Дугообразный питатель представляет из себя дугу, которая соединяет подводящий канал с цилиндрической поверхностью отливки. Такой питатель подходит для отливок в форме цилиндра или полуцилиндра. Дугообразный питатель показан на рисунке 2.1.3.



а) Правильно

б) Не правильно

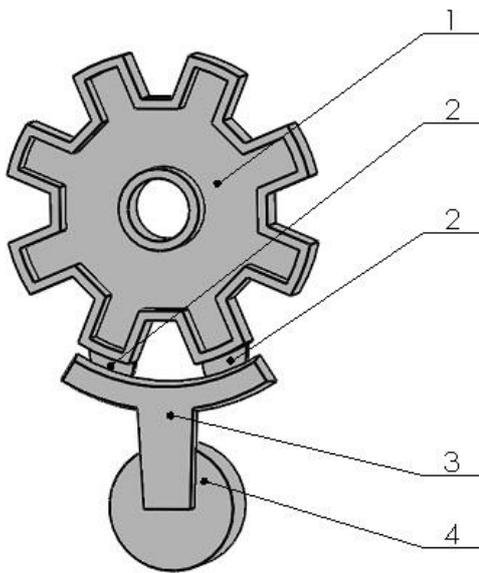
Рисунок 2.1.3 – Дугообразный питатель

Как и прямой питатель, дугообразный питатель надо подводить к стенке таким образом, чтобы поток расплава не ударялся сразу о стенку формы, а был направлен вдоль полости формы.

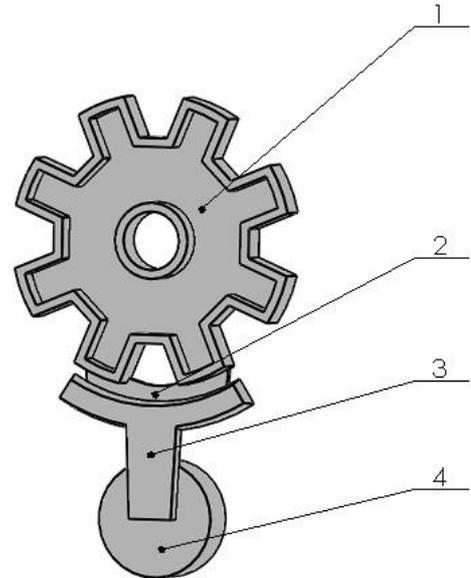
1.3) Несколько питателей.

В том случае, когда по расчёту питатель получился большой длины, есть целесообразность разделить такой питатель на несколько частей. Например, когда поверхность отливки, к которой подводится питатель, по габаритам меньше расчётного значения питателя. Или питатель может быть разделён на несколько частей для удобства отделения литниковой системы от отливки. Помимо этого, может

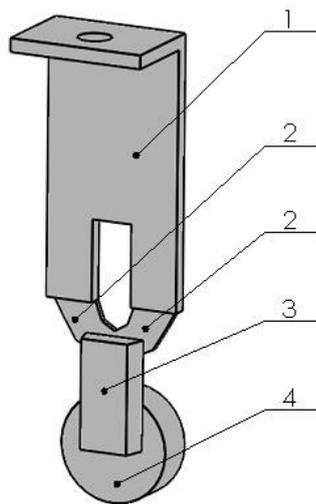
быть ситуация, когда есть целесообразность подводить расплав к различным поверхностям отливки, для более равномерного или последовательного её заполнения. Несколько питателей могут найти наибольшее применение для габаритных отливок и отливок сложной конфигурации. На рисунке 2.1.4 показаны примеры выполнения нескольких питателей для отливок плоской формы и цилиндрической.



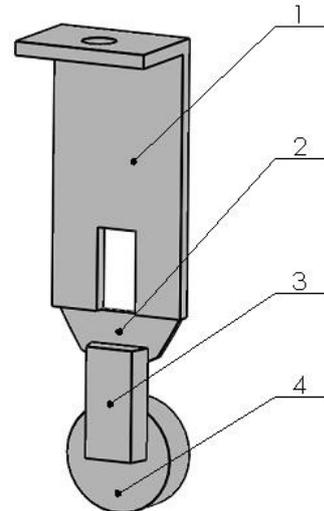
а) Правильно



б) Не правильно



в) Правильно



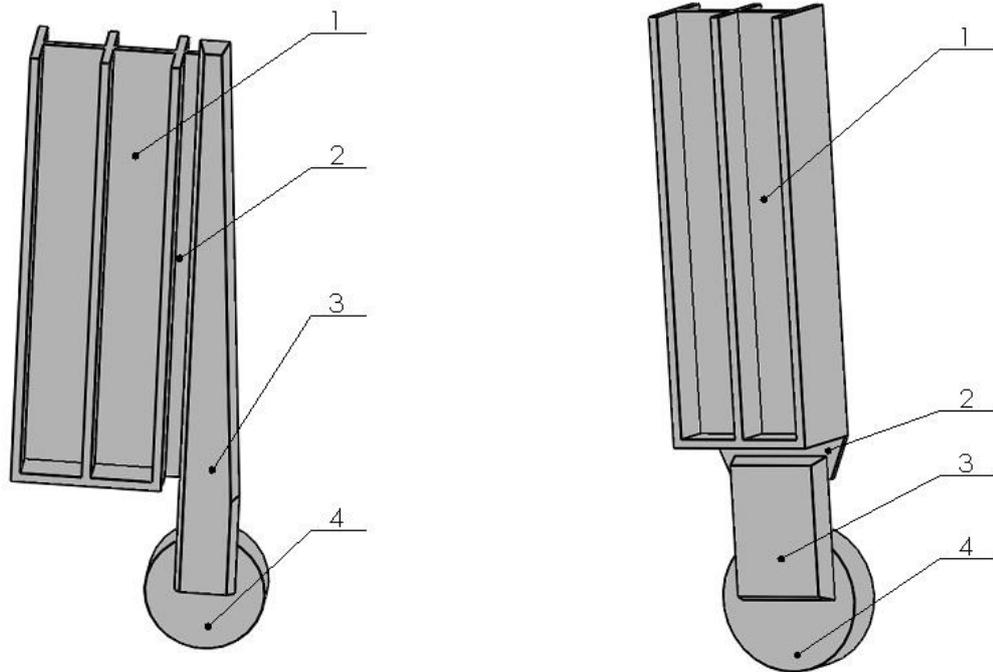
г) Не правильно

Рисунок 2.1.4 – Несколько питателей

Если геометрия отливки имеет вырез, отверстие или выступ, есть целесообразность питатель разбивать на несколько частей, чтобы подводить к таким местам отливки отдельно, учитывая её геометрию.

1.4) Щелевой питатель.

Щелевой питатель представляет из себя канал в форме параллелепипеда, соединяющий плоскую поверхность отливки с подводящим каналом, причём такой питатель выполняется по всей длине стенки отливки и размеры такого питателя могут превышать расчётные. Один из вариантов применения щелевого питателя - для литья габаритных тонкостенных отливок, когда требуется развернуть фронт движения расплава для заполнения отливки по всей плоскости. Схема щелевого питателя представлена на рисунке 2.1.5.



а) Правильно

б) Не правильно

Рисунок 2.1.5 – Щелевой питатель

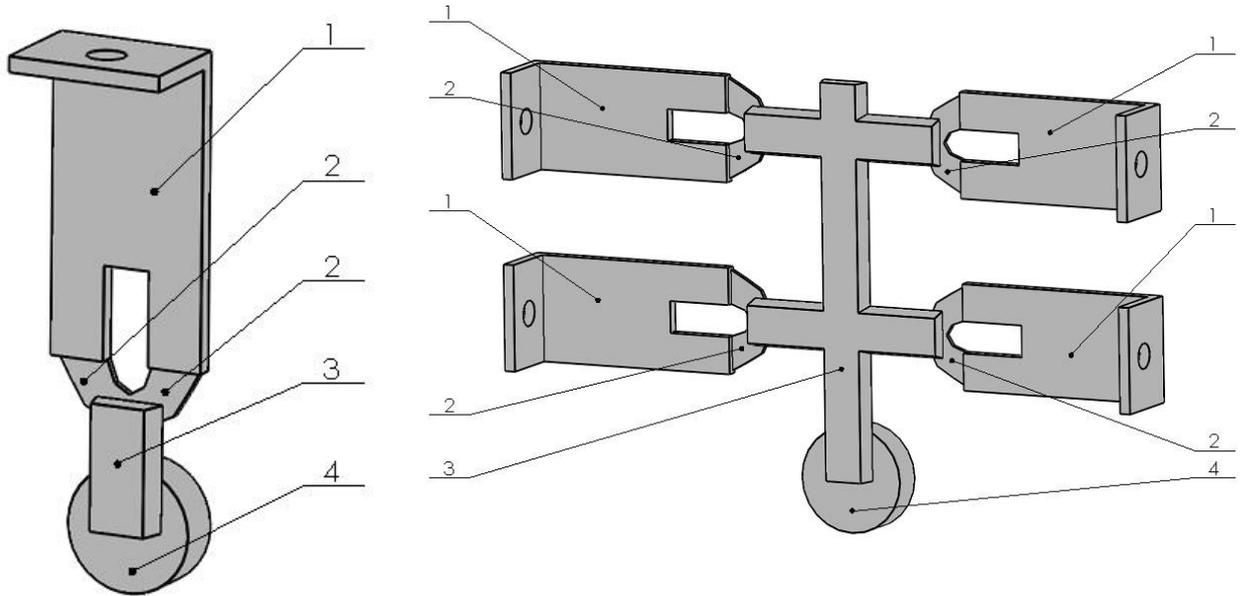
Питатель подводит расплав непосредственно к обширной полости в форме. Не целесообразно, когда питатель будет подводить расплав к той части отливки, где он будет сразу ударяться о стенку формы.

При выборе конфигурации подводящего канала следует руководствоваться принципом, чтобы минимизировать длину литникового хода от пресс-остатка до

питателя, а также для подвода расплава в нужное место отливки. На выбор типа подводящего канала будет оказывать влияние как конфигурация отливки, так и гнёздность пресс-формы.

2) Разновидности подводящих каналов

2.1) Прямой вертикальный подводящий канал.



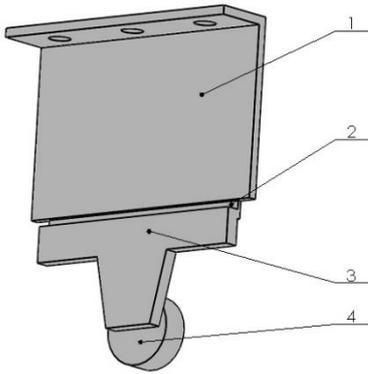
а) Одногнёздная форма

б) Многогнёздная форма

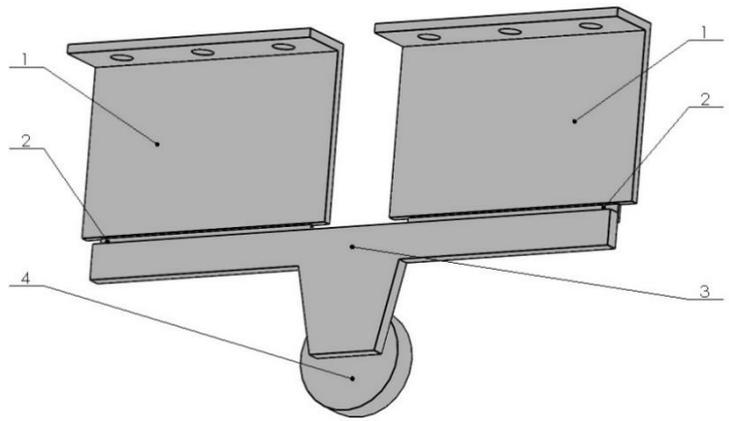
Рисунок 2.1.6 – Прямой вертикальный подводящий канал

Прямой подводящий канал подходит для отливок небольших габаритов, которые можно расположить в форме вертикально, или для многогнёздной формы - горизонтально. Самая распространённая форма подводящего канала, подходит для большинства типов отливок. В случае многогнёздной формы от основного вертикального подводящего канала идут боковые ответвления к каждой отливке.

2.2) Прямой горизонтальный подводящий канал.



а) Одногнездная форма

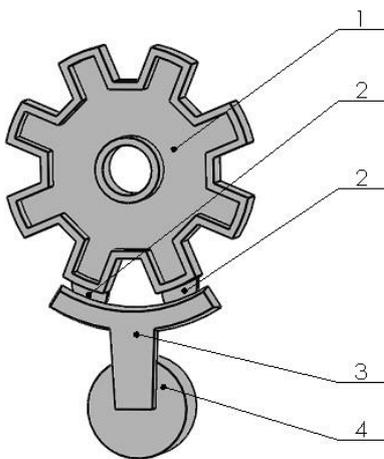


б) Многogneздная форма

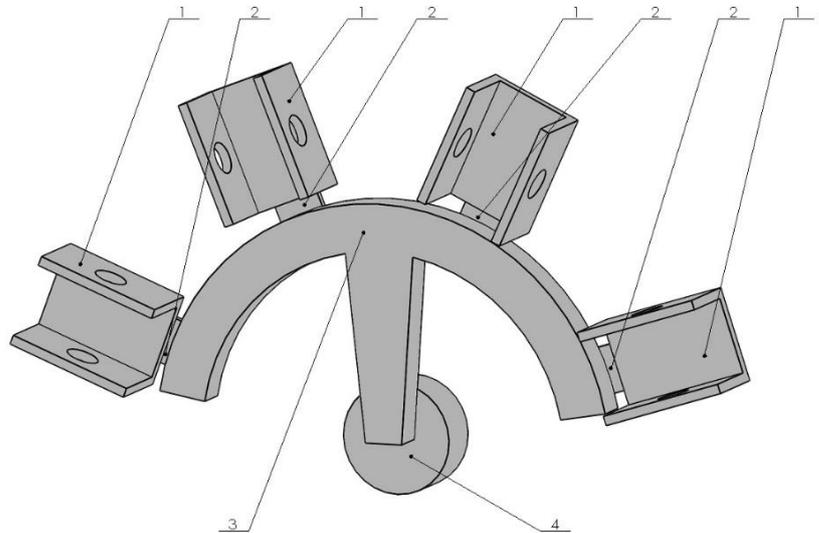
Рисунок 2.1.7 – Прямой горизонтальный подводный канал

Горизонтальный подводный канал подходит для отливок, вытянутых по ширине, которые располагаются в форме только горизонтально. Такой подводный канал имеет небольшой вертикальный участок, который соединяет его с пресс-остатком.

2.3) Дугообразный



а) Одногнездная форма

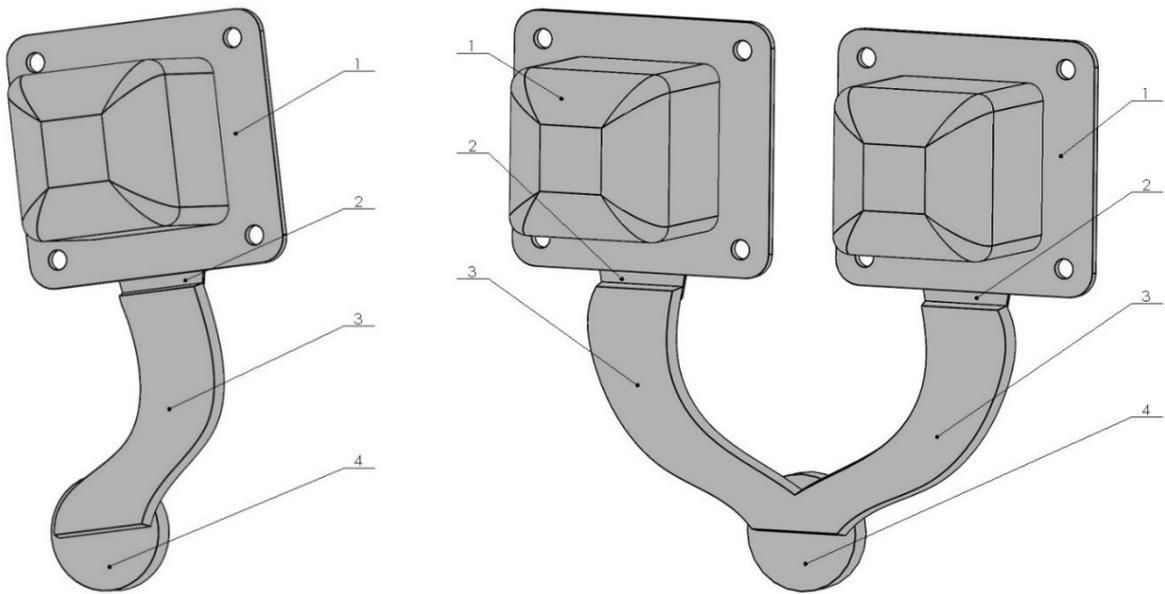


б) Многogneздная форма

Рисунок 2.1.8 – Дугообразный подводный канал

Дугообразный подводный канал подходит для отливок цилиндрической формы для одногнездных форм, или как альтернатива прямому вертикальному подводному каналу для многogneздных форм.

2.4) Изогнутый подводный канал.



а) Одногнездная форма

б) Многогнездная форма

Рисунок 2.1.9 – Изогнутый подводный канал

Подводный канал такой формы возможно применять для формирования сплошного потока расплава, чтобы исключить дробление расплава на отдельные потоки и попадание их в полость отливки.

2.5) Двойной подводный канал.

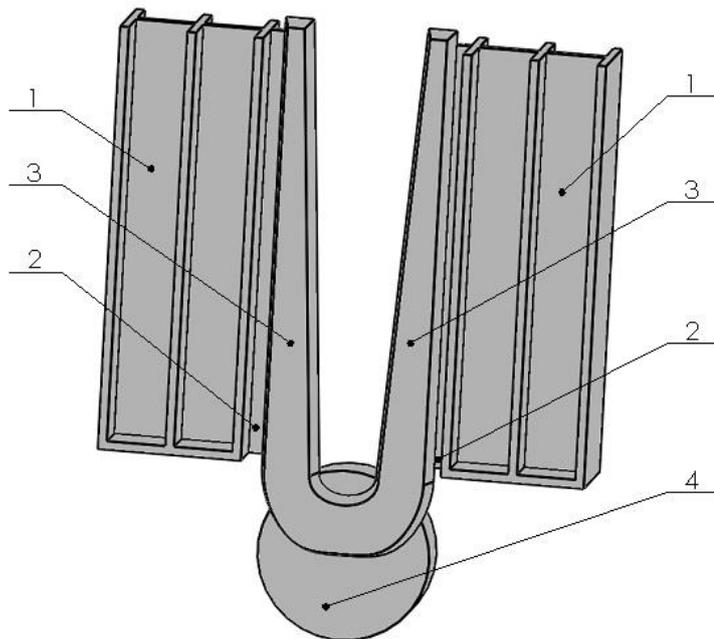


Рисунок 2.1.10 – Двойной подводный канал

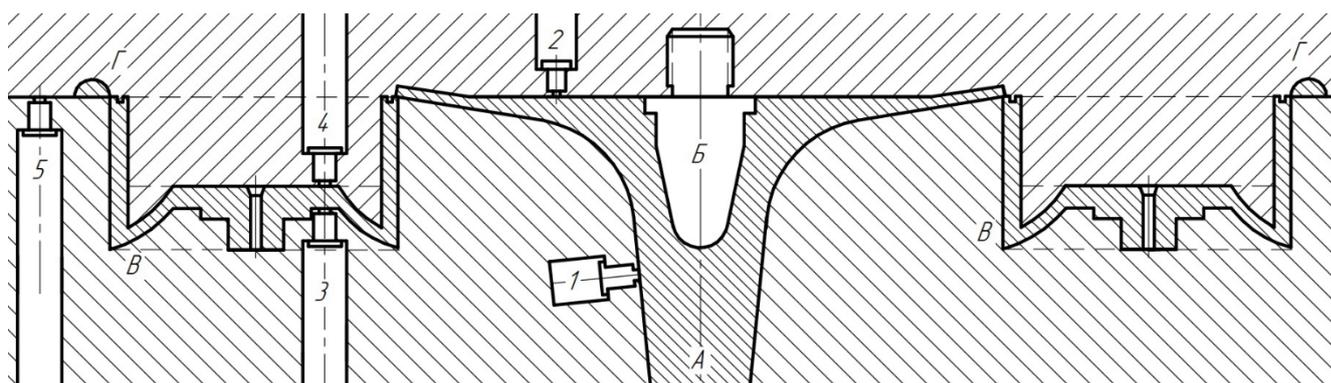
Двойной подводный канал применяется в многогнездных (двухгнездных) формах, когда есть необходимость развести поток расплава на две или более отдельных струи, для формирования направленного фронта заполнения каждой отливки.

В настоящее время для разных методов литья фасонных отливок имеется достаточно мощный математический аппарат, описывающий основные процессы их формирования, и на его базе разработанный ряд пакетов прикладных программ (ППП), позволяющих, как моделировать кинетику протекания литейных процессов, например, моделирование во FLOW 3D [82- 88], так и оптимизировать их параметры [89-94]. Однако, необходимо отметить, что если для метода литья под давлением (ЛПД) моделирующие системы автоматизированного моделирования (САМ) успешно применяются при исследовании процессов для этой технологии, то автоматизированная оптимизация их параметров из-за отсутствия современных специализированных методик и, соответственно, ППП их реализующих, затруднена. Так же не следует забывать, что использование обоих автоматизированных направлений подразумевает наличие для исходных данных ряда рекомендаций, в том числе, по классификации и применению конкретных литниковых систем для литья проектируемых изделий.

Предлагаемая классификация элементов ЛС позволяет создать универсальную базу для стандартных вариантов комбинаций ЛС для различных отливок, что возможно использовать конструктору или технологу при разработке технологии изготовления отливки. Помимо этого, используя краткое двойное обозначение ЛС по виду питателя и подводного канала, можно охарактеризовать любую из существующих ЛС для ЛПД, что вводит единую терминологию для специалистов в области литейного производства. И, наконец, предлагаемая классификация элементов ЛС позволяет создать базу для последующих автоматизированных расчетов элементов ЛС или проектирования ЛС для различных отливок.

2.2. Оценка применимости модели малой интенсивности охлаждения и типа коэффициента теплообмена в тепловых расчетах для литья под давлением

Прогноз возможности применения модели малой интенсивности охлаждения для конкретных условий процесса формирования фасонной отливки может быть осуществлен расчетным путем, в том числе компьютерного моделирования, на основе экспериментальных данных или за счет комбинированных исследований [60, 61]. Для оценки обоснованности использования данной модели в расчетах параметров процесса заполнения алюминиевыми расплавами пресс-форм при литье под давлением воспользуемся комбинированными исследованиями. В натурных экспериментах, проведенных Микелем и описанных в работе А.И. Вейника [62, 63], измерения проводились с помощью четырех поверхностных термопар (расстояние 10 ± 2 мкм от внутренней поверхности пресс-формы), расположенных в литнике №1, рассекателе №2, по длине отливки №3, №4 и одной более заглубленной в форму термопары №5, которая не соприкасалась с жидким металлом - рисунок 2.2.1. Точность измерения соответствовала $\pm 15^\circ$.



А – литник, Б – рассекатель, В – отливка, Г – промывник.

Рисунок 2.2.1 – Схема расположения пяти поверхностных термопар (1-5) в пресс-форме.

Эксперименты зафиксировали:

1) Практически мгновенное возрастание температуры поверхности пресс-формы до температуры расплава (показания термопар с №1 по №4). На термопаре №5 резкого температурного скачка зафиксировано не было. С течением времени температура поверхности пресс-формы уменьшается и становится равной средней температуре формы.

2) Температура поверхности пресс-формы обычно несколько превышает температуру заливаемого расплава. Это явление дополнительного разогрева поверхности формы объясняется выделением теплоты за счет трения расплава о стенки пресс-формы при его движении.

Проанализируем результаты экспериментов. Итак, эксперименты показали, что на этапе течения расплава по каналам пресс-формы температура формы на ее поверхности резко повышается до температуры струи расплава (повышение температуры составила порядка $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ за $0,001\text{ с}$), при этом температура на термопаре №5 в это время почти не изменилась. Данное обстоятельство свидетельствует о схожести данных тепловых процессов с тепловыми процессами при заполнении расплавом неметаллической формы, а это дает говорить о возможности применения модели малой интенсивности теплообмена.

Этот вывод также можно подтвердить расчетным анализом. Известно, что конвективный теплообмен зависит от большого числа факторов со сложным механизмом теплообмена, как внутри системы, так и на ее границах. Оценивать величину теплообмена такой системы можно с применением масштабных коэффициентов или критериев в виде определенной функциональной зависимости [64]:

$$\alpha \cdot d / \lambda = f \left(u \cdot d / \nu, c \cdot \rho \cdot \nu / \lambda, \beta \cdot g \cdot d^3 \cdot \Delta T / \nu^2 \right) \quad (2.2.1 \text{ а})$$

или

$$Nu = f(Re, Pr, Gr) \quad (2.2.1 \text{ б})$$

где: α – коэффициент теплоотдачи на границе системы, λ – коэффициент теплопроводности расплава; d – характерный размер канала формы; u – скорость движения расплава; $c \cdot \rho$ – массовая теплоемкость расплава; ν – коэффициент кинематической вязкости расплава; β – коэффициент термического расширения; g – ускорение силы тяжести; ΔT – температурный перепад; Nu – критерий Нуссельта; Re – критерий Рейнольдса; Pr – критерий Прандтля; Gr – критерий Грасгофа.

В зависимости от разных характеристик движения потока расплава обобщенное уравнение (2.2.1 б) может изменяться. Так для турбулентного потока расплава в пресс-форме $Gr \rightarrow 0$. Соответственно уравнение (2.2.1 б) примет вид.

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (2.2.1 \text{ в})$$

На основе представленной зависимости (2.2.1 в) и подхода, предложенного Г.Ф. Баландиным [65, 66] по оценке интенсивности теплообмена движущегося расплава в полости литейной формы, продолжим подтверждение о возможности применения модели малой интенсивности теплообмена для тепловых расчетов заполнения жидким алюминиевым сплавом пресс-формы ЛПД.

Для этого распишем критерий Нуссельта Nu , который характеризует интенсивность теплообмена между расплавом и стенкой пресс-формы в следующем виде:

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda_0} \cdot l \quad (2.2.1)$$

где: l – толщина стенки отливки; λ_0 – коэффициент теплопроводности жидкого сплава в покоем состоянии.

При этом можно приближенно выразить:

$$\alpha \sim \frac{\lambda_1}{l} \quad (2.2.2)$$

где: λ_1 – коэффициент теплопроводности движущегося потока расплава.

Подставим (2.2.2) в (2.2.1) и выразив λ_1 имеем:

$$\lambda_1 = \lambda_0 \cdot Nu \quad (2.2.3)$$

Помножив обе стороны уравнения (2.2.3) на $c_1 \cdot \rho_1$ и извлекая квадратный корень, приходим к выражению:

$$b_1 = \sqrt{Nu} \cdot b_0 \quad (2.2.4)$$

где: b_1 – коэффициент тепловой аккумуляции движущегося потока расплава, b_0 – коэффициент тепловой аккумуляции отливки (в покоящемся состоянии).

Далее, разделим обе части уравнения (2.2.4) на коэффициент тепловой аккумуляции пресс-формы b_ϕ и преобразуем к виду:

$$\frac{b_\phi}{b_1} = \frac{1}{\sqrt{Nu}} \cdot \frac{b_\phi}{b_0} \quad (2.2.5)$$

При ЛПД теплофизические свойства отливки и формообразующих вставок пресс-формы близки друг другу ($b_\phi \approx b_0$), тогда имеем:

$$\frac{b_\phi}{b_1} = \frac{1}{\sqrt{Nu}} \quad (2.2.6)$$

При скоростях движения расплава порядка 10 – 30 м/с и турбулентном движении потока критерий Nu является функцией от Re и Pr (2.2.1 б), а его значения находятся в интервале 12 – 27 [67, 68]. Подставляя эти значения в 2.2.6, получаем условие применимости модели малой интенсивности охлаждения для ЛПД:

$$\frac{b_\phi}{b_1} \ll 1 \quad (2.2.7)$$

Следует отметить, что условие 2.2.7 обычно используют для тепловых расчетов литья в неметаллические формы. В итоге полученные расчетные данные полностью согласуются с натурным экспериментом, проанализированном выше.

Для больших скоростей движения расплава в каналах пресс-формы выше $u_2^{\text{кр}}$ (рисунок 1.1.2) наблюдается дисперсное состояние потока. Дисперсный поток отличается от сплошного турбулентного меньшей теплоотдачей, что иллюстрируется кривыми температурных полей при заполнении пресс-формы алюминиевым сплавом АК7ч на рисунке 2.2.2 представленные авторами [77].

На основе зафиксированного факта меньшего теплообмена с формой расплава при его дисперсном режиме движения, по сравнению со сплошным турбулентным, можно сделать однозначный вывод об обоснованности применения модели малой интенсивности теплообмена и для этого случая заполнения алюминиевым расплавом пресс-формы.

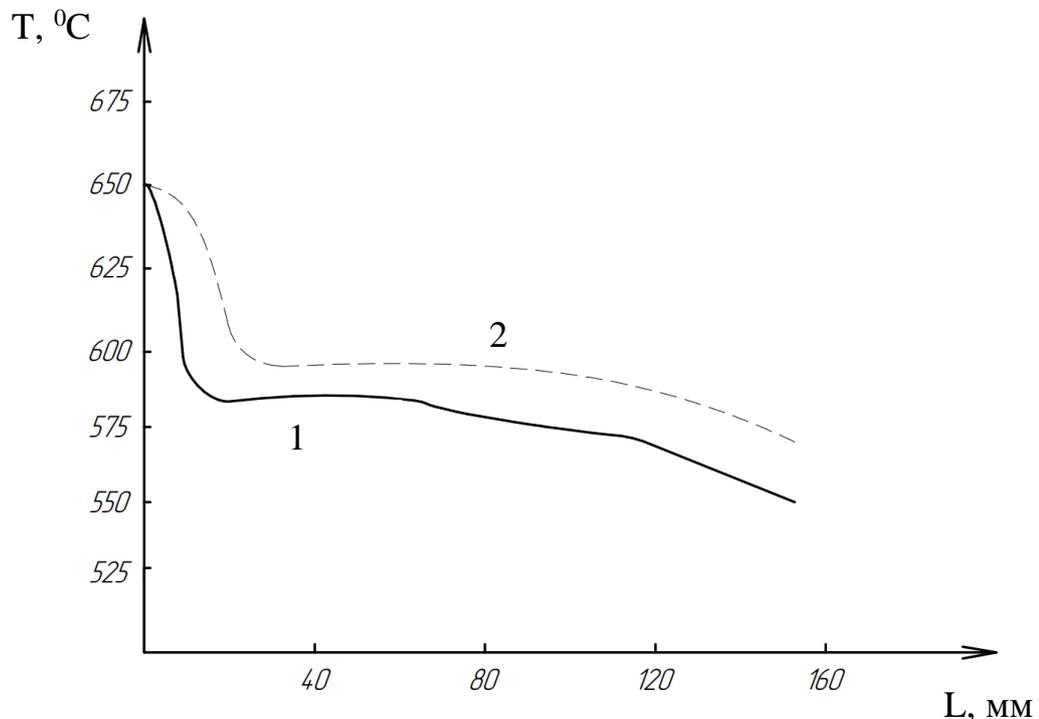


Рисунок 2.2.2 - Температурные поля в потоке заполнения: 1- сплошной турбулентный; 2 – дисперсный.

При этом коэффициент теплоотдачи от заливаемого расплава в форму α зависит от режима потока [77]:

- если поток сплошной турбулентный, то: $\alpha' = \frac{b_{\phi}}{\sqrt{\pi \cdot \tau}}$, (2.2.9)

- если поток дисперсный, то: $\alpha'' = \frac{4}{3\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\sqrt[3]{B_{\phi} (b_{\phi})^2}}{\sqrt[3]{\tau}}$, (2.2.10)

где: $B_\phi = \lambda_\phi / X_\phi$ – термическая проводимость формы в пределах ее характерного размера; X_ϕ – характерный размер формы; λ_ϕ – коэффициент теплопроводности материала пресс-формы.

Разделив выражение 2.2.10 на 2.2.9 получим симплекс $K_\alpha = \frac{\alpha''}{\alpha'}$, характеризующий изменение интенсивности теплообмена при смене режима движения расплава.

Представленные выше эксперименты по измерению температуры поверхности формы, как было отмечено, также зафиксировали дополнительное повышение температуры $\Delta T_{\text{тр}}$ в проходном канале из-за сил трения при движении в нем расплава. Однако необходимо отметить, что выделяемая теплота трения за счет движения расплава по каналам передается не только пресс-форме, но и самому расплаву.

В качестве еще одного подтверждения применимости как самой модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме, так и выбора типа литейной формы в этой модели, сравним потери перегрева расплава, полученные по этой модели, с результатами вычислительного моделирования.

Расчет потерь перегрева расплава ΔT при заполнении отдельных каналов пресс-формы будут вестись, согласно Г.Ф. Баландину [65] по формуле:

$$\Delta T = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi) \cdot \sqrt{L}}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_0 \cdot \sqrt{u}} \quad (2.2.11)$$

где: b_ϕ - коэффициент тепловой аккумуляции формы; T_L - температура ликвидус; T_ϕ - температура формы; L - длина канала; u - скорость расплава в канале; c_1 - удельная теплоёмкость расплава в жидком состоянии; ρ_1 - плотность расплава в жидком состоянии; R_0 - приведённый размер канала.

Значение приведенного размера канала определяется по формуле (2.2.12):

$$R_0 = \frac{V}{F_0} \quad (2.2.12)$$

где: V - объём канала; F_0 - площадь охлаждаемой поверхности канала.

Чтобы посчитать потери перегрева расплава при заполнении всей полости пресс-формы, необходимо разбить полость пресс-формы на несколько, последовательно заполняемых каналов простой конфигурации (обычно в форме бруса или плиты), и посчитать суммарные потери перегрева расплава при движении по этим каналам, начиная с элементов литниковой системы.

В этом случае, потери перегрева при заполнении n -го канала пресс-формы определяются по формуле (2.2.13):

$$\Delta T_n = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi)}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0n} \cdot \sqrt{u_n}} \cdot (\sqrt{L_1 + \dots + L_n} - \sqrt{L_1 + \dots + L_{n-1}}) \quad (2.2.13)$$

где: $L_{1...n}$ - длины каналов пресс-формы.

Для сравнения результатов расчета была выбрана отливка, 3-D модель которой показана на рисунке 2.2.3.

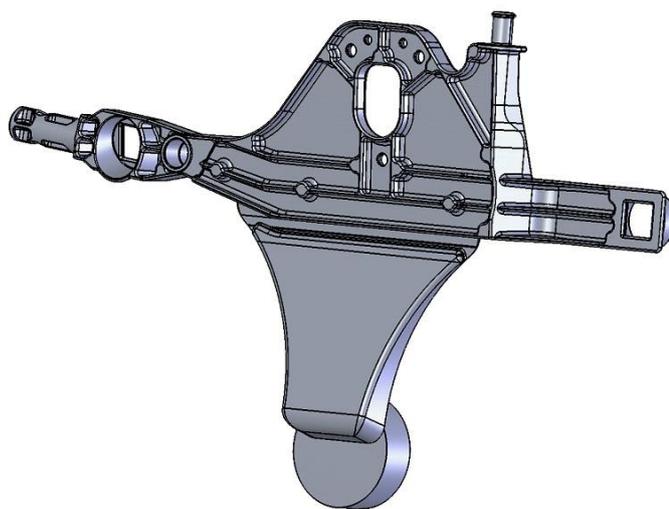
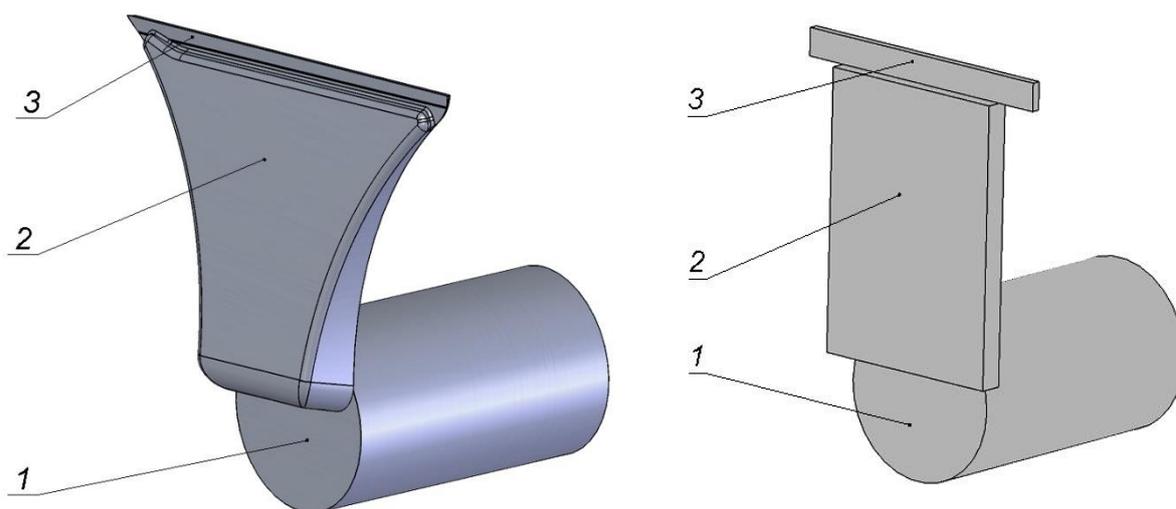


Рисунок 2.2.3 - 3-D модель отливки с литниковой системой

Для сокращения объема вычислений рассмотрим заполнение только элементов литниковой системы (ЛС), и на рисунках 2.2.4,а и 2.2.4,б представлены расчетные схемы заполнения элементов ЛС при вычислительном моделировании и по модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме соответственно.



а) вычислительное моделирование

б) аналитический расчет

Рисунок 2.2.4 - Расчетные схемы для вычислений: 1 – камера прессования, 2 – подводющий канал, 3 – питатель.

При упрощении конфигурации элементов ЛС (рисунок 2.2.4 б) в качестве критерия подобия было выбрано условие равенства приведенных размеров элементов реальной ЛС и их аналогов для аналитического расчета.

Размеры элементов ЛС (показана на рисунке 2.2.4 б) следующие: камера прессования диаметром 60 мм и длиной 100 мм; подводющий канал длиной 100 мм, шириной 70 мм, толщиной 8 мм; питатель длиной 10 мм, шириной 100 мм, толщиной 3 мм.

Скорость движения расплава (равная скорости прессового поршня) в камере прессования $u_{кп}$ принята равной 3 м/с. Скорость расплава в оставшихся каналах пресс-формы определялась, исходя из условия равенства расходов, по формуле (2.2.14):

$$u_1 = \frac{u_2 \cdot f_2}{f_1} \quad (2.2.14)$$

где: u_1 - скорость расплава в одном канале; u_2 - скорость расплава в другом канале; f_1 - площадь поперечного сечения одного канала; f_2 - площадь поперечного сечения другого канала.

Тогда скорость в подводющем канале $u_{пк}$ будет равна 15 м/с, а скорость в питателе $u_{п}$ составила 28 м/с.

Для моделирования был выбран сплав АК12 (наиболее типичный сплав при ЛПД). Согласно [65], теплофизические свойства сплава следующие: $c_1 = 1286 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, $\rho_1 = 2200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $T_L = 864 \text{ К}$. Формообразующая вставка в пресс-форме обычно выполняется из стали 4Х5МФС, тогда теплофизические свойства пресс-формы будут равны: $b_\phi = 10090 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}^{0,5}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$, $T_\phi = 443 \text{ К}$ [65].

С учетом принятых исходных данных потери перегрева в элементах ЛС, рассчитанные по модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме (формула (2.2.13), составили: потери перегрева в камере прессования $\Delta T_{\text{КП}}$ равны 20,7 К, потери перегрева в подводящем канале $\Delta T_{\text{ПК}}$ равны 15,9 К и потери перегрева в питателе $\Delta T_{\text{П}}$ равны 2,4 К.

Далее, для сравнения, были рассчитаны потери перегрева в элементах ЛС по модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме, в которой выбран другой коэффициент теплообмена по формуле (2.2.15).

$$\Delta T = \frac{\beta \cdot (T_{\text{зал}} - T_\phi) \cdot L}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_0 \cdot u} \quad (2.2.15)$$

где: β – коэффициент тепловой активности кокильной краски; $T_{\text{зал}}$ – температура заливки.

Потери перегрева при заполнении n -го канала формы при литье в кокиль определяются по формуле (2.2.16):

$$\Delta T_n = \frac{\beta \cdot (T_{\text{зал}} - T_\phi) \cdot L_n}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0n} \cdot u_n} \quad (2.2.16)$$

Для этого случая толщина слоя смазки была выбрана равной 0,05 мм, а её коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{кр}} = 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ [67, 68], тогда потери перегрева в отдельных каналах литейной формы составили: в камере прессования $\Delta T_{\text{КП}} = 1,4 \text{ К}$, потери перегрева в подводящем канале $\Delta T_{\text{ПК}} = 1,2 \text{ К}$ и в питателе $\Delta T_{\text{П}} = 0,1 \text{ К}$.

Для проверки потерь перегрева, полученных аналитически для двух типов литейной формы, было выполнено вычислительное моделирование заполнения

расплавом полости пресс-формы по указанной на рисунке 2.2.4,а модели элементов ЛС в программе FLOW 3D.

На рисунке 2.2.5 представлены результаты моделирования заполнения расплавом элементов ЛС. На рисунке 2.2.5 а) показано движение расплава по камере прессования, на рисунке 2.2.5 б) – по подводящему каналу, на рисунке 2.2.5 в) – по питателю. Цветом на рисунке обозначено изменение температуры расплава при заполнении полости пресс-формы.

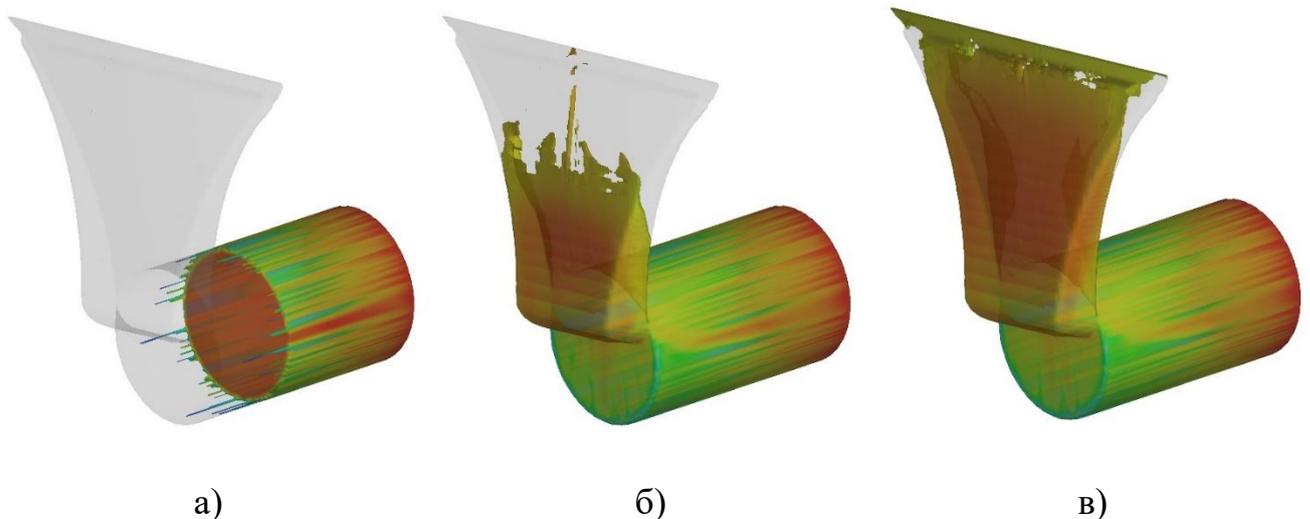


Рисунок 2.2.5 - Моделирование заполнения расплавом элементов ЛС

При моделировании были определены значения средней температуры расплава по сечению элементов ЛС в конце их заполнения, и в таблице 2.1 показаны результаты вычисления потерь перегрева расплава при заполнении элементов ЛС, полученных аналитическим и вычислительным методами.

Таблица 2.1 - Потери перегрева в элементах ЛС

Элемент ЛС	Аналитический расчет		Вычислительное моделирование
	Коэффициент теплообмена		
	b_{ϕ}	β	
	Значение потерь перегрева ΔT , град		
Камера прессования	20,7	1,4	30
Подводящий канал	15,9	1,2	10
Питатель	2,4	0,1	1

Результаты сравнения подтверждают справедливость выбора коэффициента теплообмена при аналитическом расчете. Если выбрать коэффициент β , то разница потерь перегрева с вычислительным моделированием составляет сотни процентов и не может считаться удовлетворительной.

При выборе коэффициента b_ϕ , погрешность вычислений уменьшается и составляет для конкретного примера от 31 % (для камеры прессования) до 58 % (для питателя).

С учетом сложности физических процессов, происходящих с расплавом при ЛПД, и тех допущений, которые приняты при аналитическом расчете, полученную погрешность в расчетах можно принять и считать удовлетворительной. Связано это, прежде всего с тем, что аналитический расчет служит для нахождения лишь начального значения температуры заливки, которая затем уточняется и оптимизируется при вычислительном моделировании.

Еще одним доводом в пользу применимости предложенного аналитического расчета потерь перегрева служат графики, представленные на рисунке 2.2.4.

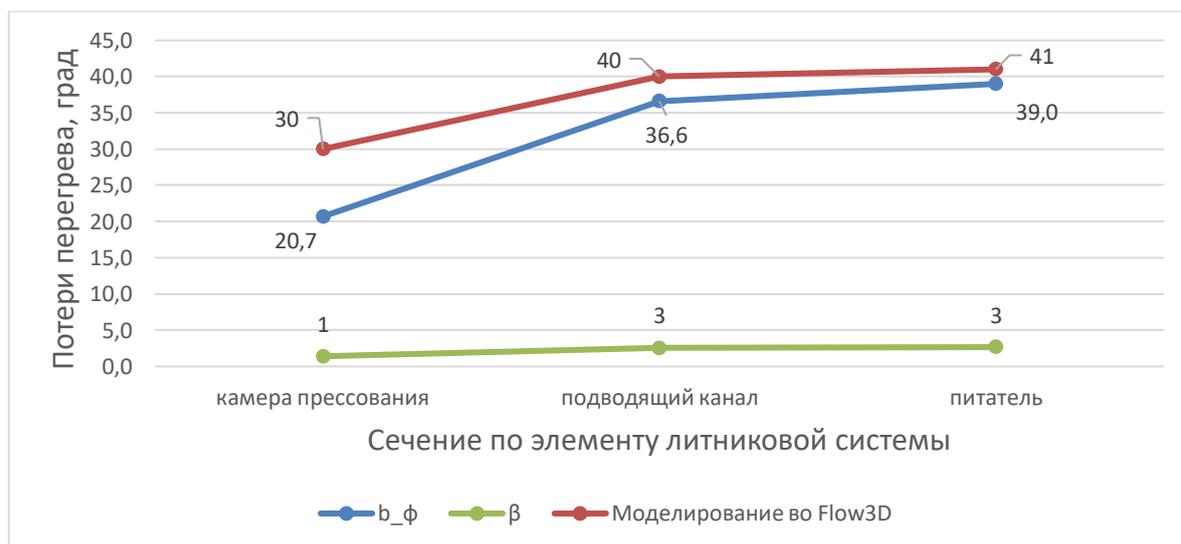


Рисунок 2.2.6 - Суммарные потери перегрева в элементах ЛС

На рисунке 2.2.6 показаны графики суммарных потерь перегрева расплава при заполнении элементов ЛС, полученных аналитическим и вычислительным методами.

В связи с тем, что погрешность аналитического расчета потерь перегрева в разных каналах разнонаправленна (как в сторону увеличения, так и уменьшения),

то погрешность суммарных потерь перегрева (а нас интересуют именно эти значения), как показали дальнейшие исследования, могут быть гораздо ниже, чем погрешность потерь в отдельно взятом канале пресс-формы. В конкретном примере погрешность определения суммарных потерь перегрева составила всего 4,8 %.

2.3. Разработка методики расчета потерь перегрева расплава на основе модели малой интенсивности при решении прямой задачи, с учетом сил трения при движении расплава по каналам пресс-формы

Согласно рассмотренной выше модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме, потери перегрева расплава при заполнении одного канала пресс-формы при ЛПД с учетом формулы (2.2.11) и выделяемой теплоты за счет трения движущегося жидкого сплава о ее стенки имеем следующее выражение по потере перегрева движущегося расплава на рассматриваемом участке:

$$\Delta T = \frac{1,13 \cdot b_{\phi} \cdot (T_L - T_{\phi}) \cdot \sqrt{L}}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_0 \cdot \sqrt{u}} - \Delta T_{\text{тр}} \quad (2.3.1)$$

где: b_{ϕ} - коэффициент тепловой аккумуляции пресс-формы; T_L - температура ликвидус; T_{ϕ} - температура пресс-формы; L - длина канала; u - скорость расплава в канале; c_1 - удельная теплоёмкость расплава в жидком состоянии; ρ_1 - плотность расплава в жидком состоянии; R_0 - приведённый размер канала, $\Delta T_{\text{тр}}$ - повышение температуры в системе расплав – пресс-форма за счет сил трения.

Значение приведенного размера канала определяется из выражений (2.3.2) [65]:

- если $L \approx A_0 \gg H_0$, то $R_0 = H_0/2$;
- если $L > 10A_0 \approx 10H_0$, то $R_0 = S_0/P_0$;
- если $L \leq 10A_0 \approx 10H_0$, то $R_0 = V_0/F_0$.

(2.3.2)

где: A_0 и H_0 - соответственно ширина и высота канала; S_0, P_0 - площадь поперечного сечения канала и периметр этого сечения; V_0, F_0 - объём канала и площадь его поверхности.

Чтобы рассчитать потери перегрева расплава при заполнении всей полости пресс-формы, необходимо разбить эту полость на несколько, последовательно заполняемых каналов общим количеством N с разными приведенными размерами, и определить суммарные потери перегрева расплава при движении по этим каналам, начиная с каналов литниковой системы.

В этом случае, потери перегрева при заполнении i -го канала пресс-формы сплошным турбулентным потоком рассчитываются на основе формулы (2.3.3):

$$\Delta T_i = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T'_{\phi i})}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0i} \cdot \sqrt{u_i}} \cdot (\sqrt{L_1 + \dots + L_i} - \sqrt{L_1 + \dots + L_{i-1}}) - \Delta T_{\text{тме}i} \quad (2.3.3)$$

где: L_i - длина i -го канала пресс-формы, ($1 \leq i \leq N$); N – общее количество заполняемых расплавом каналов; u_i - скорость расплава в i -ом канале; R_{0i} - приведённый размер i -го канала; $T'_{\phi i} = T_\phi + \Delta T_{\text{три}i}$ – донагрев формы на i -ом участке за счет выделения теплоты трения $\Delta T_{\text{три}i}$ на величину $\Delta T_{\text{тфи}}$.

Потери перегрева в случае дисперсного режима заполнения i -го канала пресс-формы с учетом расчетной величины коэффициента теплоотдачи от расплава в пресс-форму (2.2.9) и формула (2.2.10) могут быть определены по следующему уравнению:

$$\Delta T_i = \frac{0,75 \cdot \sqrt[3]{B_\phi \cdot b_\phi^2 \cdot (T_L - T'_{\phi i})}}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0i} \cdot \sqrt[3]{u_i^2}} \cdot [\sqrt[3]{(L_1 + \dots + L_i)^2} - \sqrt[3]{(L_1 + \dots + L_{i-1})^2}] - \Delta T_{\text{тме}i} \quad (2.3.4)$$

Зная значение скорости потока в питателе, скорость в любом другом канале пресс-формы определяется исходя из условия равенства расходов в каналах по формуле (2.3.5):

$$u_i = \frac{u_{i-1} \cdot f_{i-1}}{f_i} \quad (2.3.5)$$

где: f_i - площадь поперечного сечения i -го канала; f_{i-1} - площадь поперечного сечения $i-1$ -го канала; u_{i-1} - скорость расплава в $i-1$ -ом канале.

Вид режима движения алюминиевого расплава в $i-1$ -ом канале пресс-формы возможно определить на основе экспериментальных данных, представленных на рисунке 1.1.2. Для удобства расчетов опишем критические скорости $u_1^{\text{кр}}$ и $u_2^{\text{кр}}$ аппроксимационными выражениями и выразим $\delta_{\text{пит}}$ через R_0 в соответствии с (2.3.2).

$$u_1^{\text{кр}} = -2 \cdot \delta_{\text{пит}} + 6 \quad (2.3.6)$$

$$u_2^{\text{кр}} = -11 \cdot \delta_{\text{пит}} + 46 \quad (2.3.7)$$

Сравнивая расчетную скорость расплава в i -ом канале пресс-формы с ее критическим аналогом $u^{\text{кр}}$ выясняем режим его движения.

Как отмечалось выше, дополнительный нагрев системы расплав - форма происходит за счет трения расплава о стенки каналов при его движении [71]. При этом, повышение температуры расплава из-за сил трения $\Delta T_{\text{тр}}$ с учетом уравнений (1.1.8) и (1.1.9) в i -ом канале пресс-формы можно представить выражением:

$$\Delta T_{\text{тр}i} = \frac{0,239 \cdot F_{\text{пск}} \cdot \rho'_1 \cdot (\xi_{\text{сд}} + \xi_{\text{мс}}) \cdot \frac{u_{\text{кр}i}^2}{2g} \cdot L_n}{V'_1 \cdot \rho'_1 \cdot c'_1}, \quad (2.3.8)$$

Опираясь на гидравлические исследования работ [56, 50, 72], а так же практические рекомендации по заполнению расплавом форм для гравитационного литья [73-79], применим аналогичный подход по фиксации основных видов местных сопротивлений и на трение, а также и их численных параметров при литье под давлением алюминиевых сплавов с холодной горизонтальной камерой прессования. В связи с этим, выделим следующие основные виды местных сопротивлений и значения соответствующих коэффициентов на трение:

1. Повороты каналов $\xi'_{\text{пов}}$ под разным углом поворота:

Угол поворота:	30 ⁰	60 ⁰	90 ⁰	120 ⁰
$\xi'_{\text{пов}}$	0,2	0,55	1,1	1,4

2. Внезапное сужения сечения канала $\xi'_{\text{с сеч}}$:

Соотношение площадей сечений:	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
.....	0,42	0,34	0,25	0,15...	0

1. Внезапное расширение сечения канала $\xi'_{p \text{ сеч}}$:

$$\xi'_{p \text{ сеч}i} = \left(\frac{f_2}{f_1} - 1 \right)^2, \quad (2.3.9)$$

где: f_1 и f_2 – узкое и широкое поперечные сечения каналов по ходу движения расплава.

2. Постепенное (конусное) расширение канала $\xi'_{рк \text{ сеч}}$:

$$\xi'_{рк \text{ сеч}i} = k_{рки} \left(\frac{f_H}{f_K} - 1 \right)^2, \quad (2.3.10)$$

где: f_H и f_K – начальное (большее) и конечное (меньшее) поперечные сечения канала по ходу движения расплава; $k_{рки}$ – коэффициент, зависящий от угла конусности θ .

Угол конусности:	20°	40°	50°	60°
$k_{рк}$	0,41	0,55	1,1	1,4

5. Коэффициент сопротивления на трение о стенки по длине прямого канала $\zeta_{сд}$ равен.

$$\zeta_{сдi} = \lambda_{Rei} \cdot L_{ки} / D_{эки}, \quad (2.3.11)$$

Величина коэффициента гидравлического сопротивления λ_{Re} является функцией числа Рейнольдса Re и может быть определена по номограмме в работе [74], а также рассчитана по приближенной формуле А.Д. Альтшуля, которая гладких труб имеет следующий вид:

$$\lambda_{Rei} = 0,11 \cdot (68/Re_i)^{0,25} \quad (2.3.12)$$

Для удобства разработки автоматизированных решений практических задач [80, 81], связанных с проектированием технологических процессов литья под давлением с горизонтальной камерой прессования, и исходя из выделенных видов местных сопротивлений с их основными встречающимися на практике параметрами, имеем максимально возможное суммарное количество местных

сопротивлений в i -ом канале равно s , т.е. $s = m + k'$ (m – количество поворотов в канале, k' – количество внезапных изменений сечений по длине канала).

Выделенные углы поворотов в канале, углы конусности каналов, а также отношения площадей сечений сопряженных каналов литниковой системы и рабочей полости пресс-формы охватывают практически весь их спектр. Исходя из этого, суммарная величина коэффициентов местных сопротивлений при поворотах в каналах и внезапных изменениях сечений определяется выражениями 2.3.13 и 2.3.14:

$$\xi''_{пов\ i} = 0,2 \cdot m_1 + 0,55 \cdot m_2 + 1,04 \cdot m_3 + 1,4 \cdot m_4 \quad (2.3.13)$$

$$\xi''_{сеч\ i} = 0,42 \cdot k_1 + 0,34 \cdot k_2 + 0,25 \cdot k_3 + 0,15 \cdot k_4 \quad (2.3.14)$$

где: m_p – число поворотов в канале под определенным углом поворота ($p = 1 \div 4$);

k_j – число сопряжений в канале с определенным отношением площадей при внезапном сужении канала ($k = 1 \div 4$).

В результате общая сумма сопротивлений на пути движения расплава по каналам пресс-формы находится из следующего выражения:

$$\xi_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \left[(\xi''_{пов\ i} + \xi''_{сеч\ i} + \xi'_{р\ сеч\ i} + \xi'_{рк\ сеч\ i}) \cdot \left(\frac{f_{стк}}{f_i} \right)^2 + \xi_{сд\ i} \right] \quad (2.3.15)$$

где: ξ''_i – коэффициент сопротивления, соответствующий виду местного сопротивления i -го канала; i – порядковый номер канала; $\xi'_{р\ сеч\ i}$, $\xi'_{рк\ сеч\ i}$ – коэффициенты сопротивления на трение каналов с внезапным и конусным расширениями.

Приведенные выше решения позволяют определить по формуле (2.3.8) дополнительное повышение температуры $\Delta T_{тр}$ в проходном канале из-за сил трения при движении в нем расплава.

Выше было отмечено, что не вся «теплота трения» $\Delta T_{тр}$ передается расплаву сплава, но частично и материалу канала, по которому он движется. Очевидно, важную роль играет скорость передачи тепла от контактного слоя системы расплав-форма, как в расплав, так и в форму. Физической величиной, характеризующей

скорость выравнивания температуры вещества в неравновесных тепловых процессах является коэффициент его температуропроводности a . Поэтому подходящей относительной теплофизической характеристикой для учета этого процесса может служить параметрический критерий – симплекс подобия физических свойств K_a отношений коэффициентов температуропроводности материала формы (поршневого канала и пресс-формы) a_ϕ к применяемому алюминиевому расплаву a'_1 , т.е.:

$$K_a = \frac{a_\phi}{a'_1} \quad (2.3.16)$$

Тогда из полученного общего повышения температуры за счет сил трения $\Delta T_{тр}$ могут быть выделены количественные значения повышения температуры, пошедшие на донагрев расплава и формы:

- донагрев расплава

$$\Delta T_{тме} = \Delta T_{тр} \cdot (1 - K_a) \quad (2.3.17)$$

- донагрев формы

$$\Delta T_{тф} = \Delta T_{тр} - \Delta T_{тме} \cdot (1 - K_a) \quad (2.3.18)$$

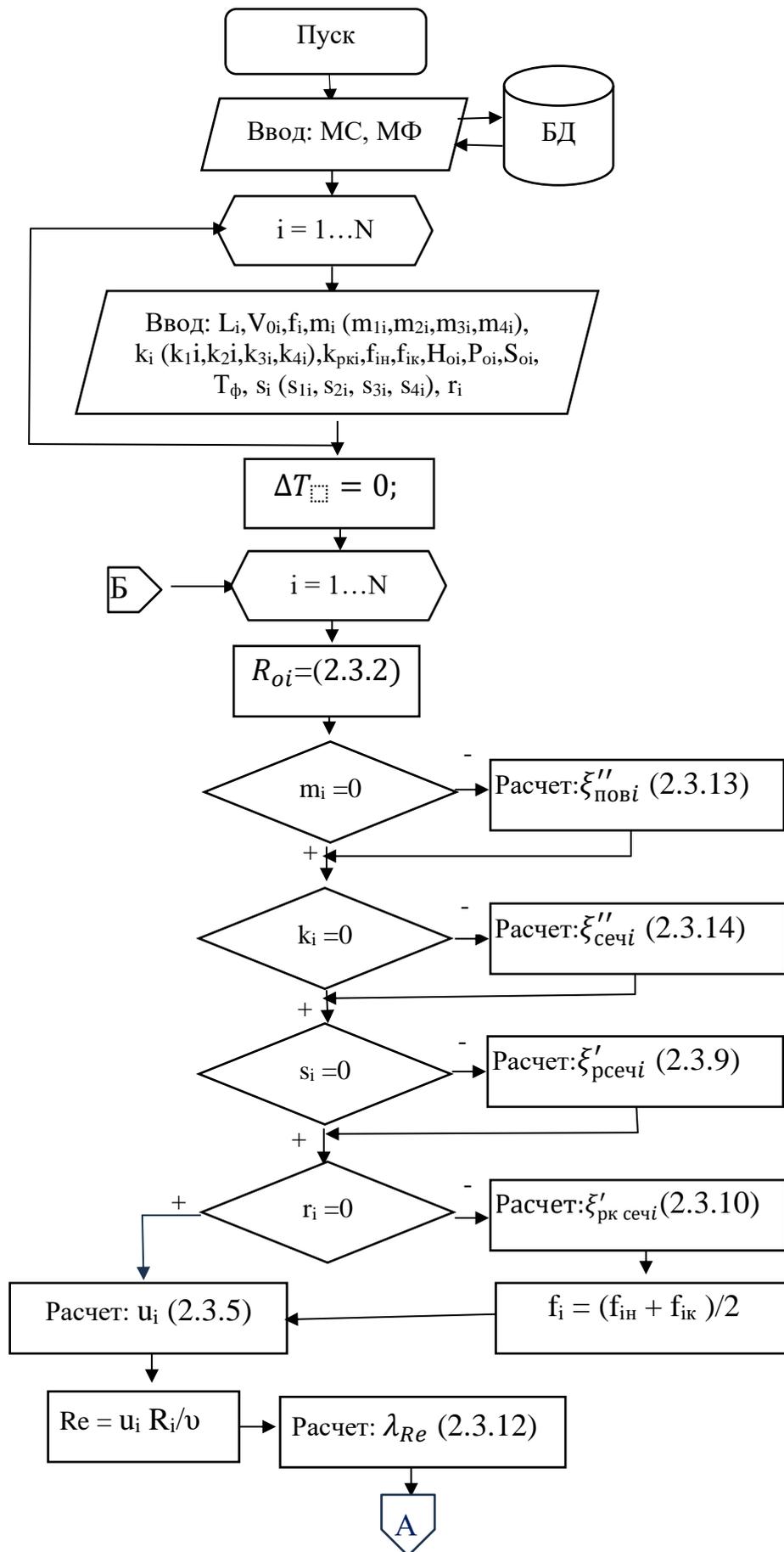
В результате, после определения потерь перегрева в каждом канале пресс-формы и с учетом повышения температуры расплава за счет сил трения, суммарные потери перегрева расплава ΔT_Σ можно определить из выражения:

$$\Delta T_\Sigma = \sum_{i=1}^N (\Delta T_i - \Delta T_{тмеi}) \quad (2.3.19)$$

где: ΔT_i - потери перегрева в рассматриваемом канале пресс-формы из общего их количества N .

Учет дополнительного нагрева расплава при его заполнении литейной пресс-формы особенно актуален при решении оптимизационных задач по определению температуры заливки сплава для протяженных тонкостенных отливок, в том числе, сложной геометрии.

Алгоритм для автоматизированного расчета суммарных потерь перегрева расплава ΔT_{Σ} при его движении в каналах пресс-формы по представленной выше методике представлен на рисунке 2.3.1.



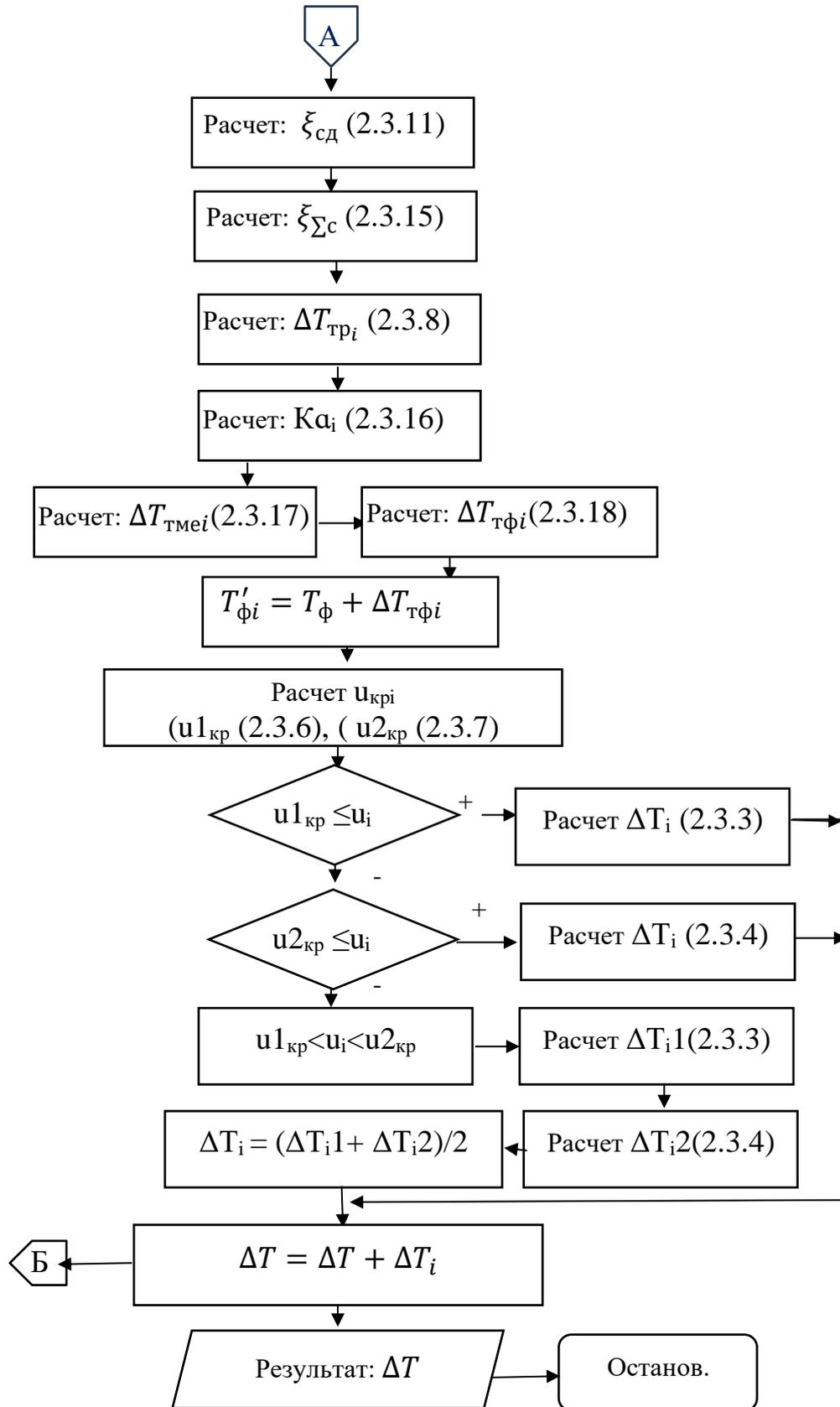


Рисунок 2.3.1 - Алгоритм расчета потерь перегрева расплава в пресс-форме

На первом этапе, перед началом расчета, необходимо выделить N участков ЛС и отливки и пронумеровать их в соответствии с последовательностью заполнения расплавом. При этом, если к питающему каналу подсоединено несколько отливок, то рассматривать нужно наиболее продолжительный путь движения расплава по каналам формы для определения максимальных потерь перегрева в нем.

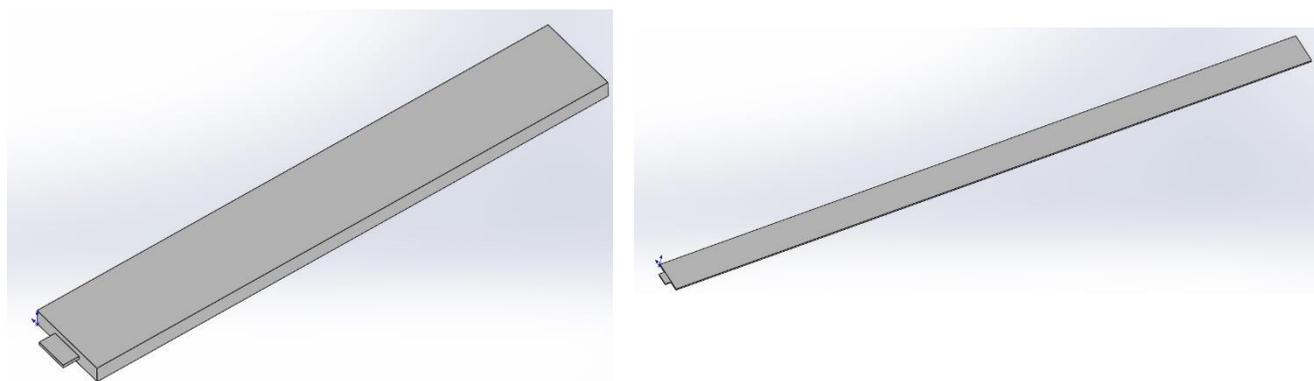
Затем после ввода исходных данных по геометрическим параметрам ЛС и отливки, а также теплофизических характеристик используемых материалов, которые извлекаются из базы данных БД в соответствии с кодами по материалам сплава МС и формы МФ, осуществляется поэлементный расчет потерь перегрева расплава ΔT_i на каждом участке рассматриваемой системы и его пошаговая суммарная фиксация ΔT по рекуррентной формуле. Предварительно для каждого i -го участка определяется его приведенный размер R_i , выявляются в зависимости от геометрии канала (коды m , k , s и r) типы местных сопротивлений и рассчитываются величины их коэффициентов. После этого вычисляются скорость течения расплава в этом канале пресс-формы, критерий Рейнольдса, который участвует в расчетах коэффициента гидравлического сопротивления λ_{Re} этому течению, и коэффициент сопротивления на трение о стенки по длине прямого канала. Следующая последовательность действий заключается в расчетах суммарных сопротивлений на пути движения расплава по i -му каналу пресс-формы, повышения температуры за счет явления трения $\Delta T_{тр_i}$ и ее численного участия в донагреве формы $\Delta T_{тф_i}$ и расплава $\Delta T_{тме_i}$ в его головной части потока. Затем в зависимости от характера движения потока расплава на рассматриваемом участке определяются потери его перегрева ΔT_i с учетом донагрева за счет сил трения по соответствующим формулам. И, наконец, расчетный цикл заканчивается рекуррентной формулой, фиксирующей прибавление суммарного значения потерь перегрева. Для следующего канала, расположенного по ходу движения расплава по полости пресс-формы, расчеты повторяются. Расчетный цикл заканчивается после обращения к последнему элементу N системы и осуществляется вывод искомого расчетного параметра ΔT .

2.4. Расчет особенностей потерь перегрева расплава при заполнении пресс-форм для отливок разной конфигурации

Как было отмечено в главе 1.1.3., существующие рекомендации по назначению температуры заливки для ЛПД не учитывают потери перегрева при заполнении полости отливки. Т.е. считается, что если расплав дошел до питателя с температурой выше температуры ликвидуса, то полость отливки в пресс-форме будет заполнена расплавом. Данное утверждение не вызывает сомнений для небольших отливок и толстостенных отливок. Но, в случае с тонкостенными и, особенно с тонкостенными протяженными отливками, эти рекомендации нуждаются в проверке.

Для выяснения особенностей потерь перегрева, проведем эксперименты вычислительным моделированием. Возьмем несколько отливок простой формы одинакового объема, и будем изменять у них толщину стенки. Соответственно, для сохранения одинакового объема, будет изменяться длина одной из отливок. И заполним такие отливки расплавом с одинаковой скоростью впуска (скорость расплава на выходе из питателя). При этом будем анализировать количество твердой фазы, образующейся на носике потока при движении расплава. Из теории литья известно, что поток расплава при ЛПД гарантированно остановится при накоплении доли твердой фазы на носике потока в 40-50% от объема расплава.

Спроектируем две отливки одинакового объема, равным 20000 мм^3 . В отливках будем менять толщину стенки и длину, для сохранения значения объема, оставляя без изменений ширину отливки. Первая отливка получилась размерами: длина 160 мм, ширина 25 мм, толщина 5 мм - рисунок 2.4.1(а). Вторая отливка получилась размерами: длина 534 мм, ширина 25 мм, толщина 1,5 мм - рисунок 2.4.1(б).



а) толщина стенки 5 мм

б) толщина стенки 1,5 мм

Рисунок 2.4.1 - 3-D модели отливок

Для данных отливок посчитаем литниковую систему по формуле (1.2.1). Для уменьшения времени моделирования литейных процессов, рассчитывать будем только сечение питателя и задавать в нем скорость, т.к. именно сечение питателя будет определять характер формирования потока расплава при заполнении полости пресс-формы.

Площадь питателя:

$$f_{\text{пит}} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{0,06 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 15 \cdot 1,5 \cdot 1,75} = 9,4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 9,4 \text{ мм}^2$$

Зададим толщину питателя 1 мм, а ширину 10 мм.

Далее проведем моделирование заполнения расплавом полости пресс-формы для первой и второй отливки в программе FLOW 3D. Температуру заливки зададим на 100 градусов выше температуры ликвидус (973 К), заливаемый сплав – АК12, материал пресс-формы – сталь 4Х5МФС, начальная температура пресс-формы – 473 К. Зададим скорость впуска для каждой отливки равной 39 м/с.

Результаты моделирования заполнения расплавом отливки толщиной 1,5 мм при скорости впуска 39 м/с показаны на рисунке 2.4.2, под пунктами а), б), в) показаны разные моменты времени заполнения расплавом пресс-формы. Цветовая шкала показывает долю твердой фазы по сечению отливки, в диапазоне от 0 до 40%.

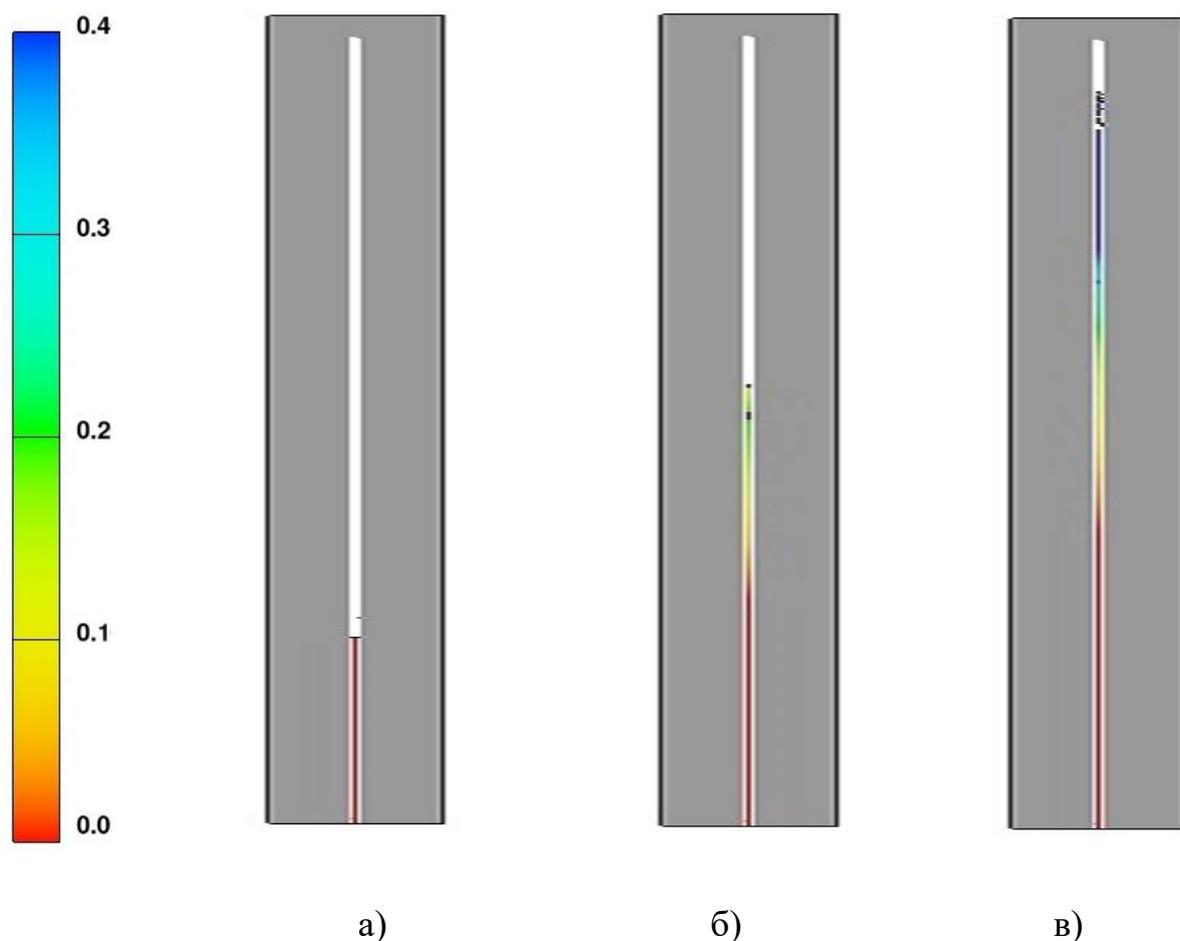


Рисунок 2.4.2 - Моделирование заполнения отливки толщиной 1,5 мм, при скорости 39 м/с

Как видно из результатов моделирования, расплав заполняет отливку сплошным фронтом снизу вверх, при активном теплообмене с пресс-формой. Что видно по накоплению твёрдой фазы по мере движения расплава. И уже при достижении расплава половины высоты полости отливки, доля твёрдой фазы достигает значений 30%. Т.е. поток начинает останавливаться, что приводит к его дроблению на отдельные струи, которые также интенсивно теряют перегрев и накапливают долю твёрдой фазы. В итоге, расплав не успевает дойти до верхней плоскости отливки, чтобы полностью повторить ее геометрию, т.е. происходит недолив примерно 15% от объема отливки. Таким образом, при такой толщине отливки и скорости впуска, накопившаяся доля твёрдой фазы препятствует полному заполнению расплавом полости пресс-формы.

Результаты моделирования заполнения расплавом отливки толщиной 5 мм при скорости впуска 39 м/с показаны на рисунке 2.4.3, под пунктами а), б), в)

показаны разные моменты времени заполнения расплавом пресс-формы. Цветовая шкала показывает долю твердой фазы по сечению отливки, в диапазоне от 0 до 40%.

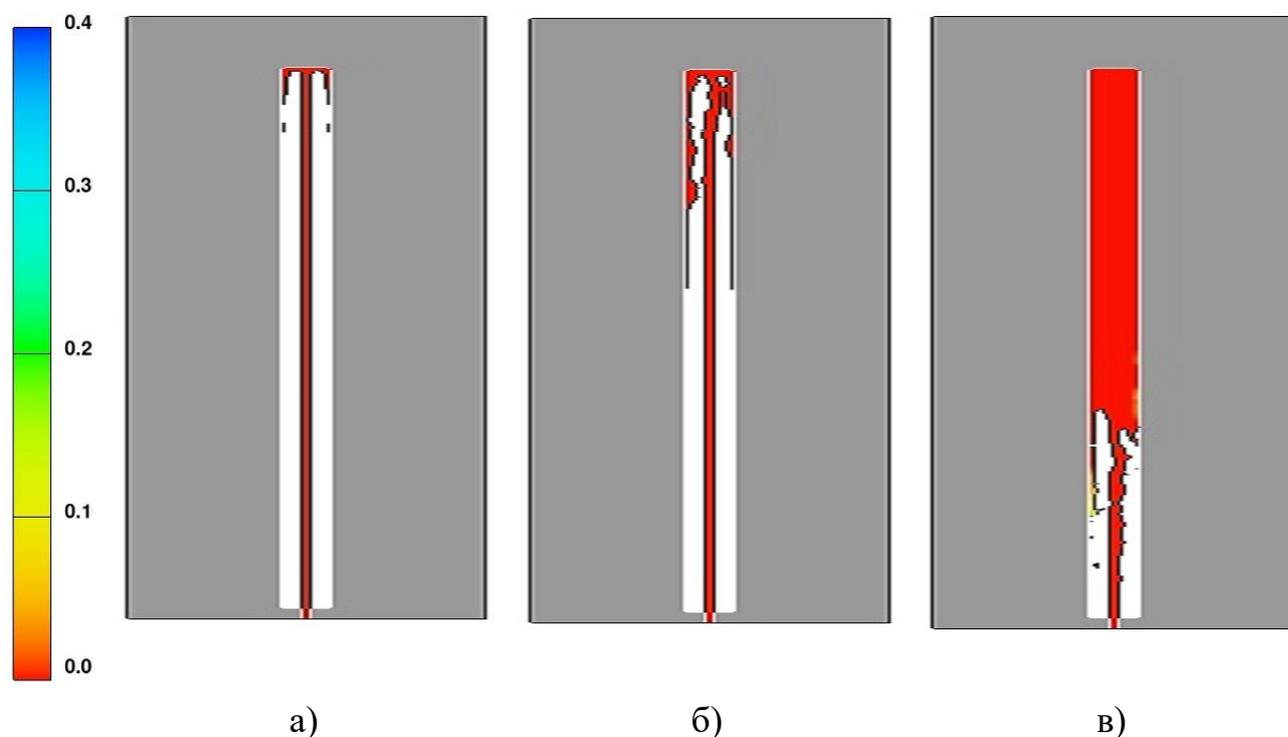


Рисунок 2.4.3 - Моделирование заполнения отливки толщиной 5 мм, при скорости 39 м/с

Как видно из результатов моделирования, характер заполнения данной отливки существенно отличается от отливки толщиной 1,5 мм. Если в первом случае заполнение отливки происходило сплошным фронтом, то отливка толщиной 5 мм заполняется по принципу оболочки («чулка»). Расплав сплошной струей сначала движется вверх, не касаясь стенок пресс-формы, и достигает верхней стенки пресс-формы, после чего дробится на два потока и начинает движение вниз вдоль вертикальных стенок пресс-формы. Как можно заметить, струя расплава, движущаяся по центру вверх, практически не теряет перегрев и не накапливает твердой фазы, т.к. контактирует только с воздушной средой. А в потоках расплава, движущихся вниз вдоль стенок, начинается образование доли твердой фазы, которая достигает максимальных значений, превышающих 40%, при достижении боковыми потоками расплава нижней части пресс-формы. После образования оболочки начинается заполнение расплавом внутренней полости пресс-формы, при этом более горячие

потоки расплава частично расплавляют образовавшуюся твердую фазу в нижней части пресс-формы. В итоге, при полном заполнении полости пресс-формы, доля твердой фазы в нижней части отливки по объему составляет меньшее значение, чем при образовании оболочки. Т.е. можно сделать вывод, что для такой конфигурации отливки при заданной скорости, образующаяся доля твердой фазы расплава не будет препятствовать заполнению пресс-формы.

Таким образом, как показали результаты моделирования, для тонкостенных отливок потери перегрева при заполнении полости отливки (накопление доли твердой фазы) составляют существенные значения, т.к. расплав заполняет полость отливки сплошным фронтом. И если не учитывать этот интенсивный теплообмен между отливкой и пресс-формой, это может привести к недоливам и неспаям при литье тонкостенных протяженных отливок.

2.5. Выводы по второй главе

1. С целью систематизации литниковых систем, применяемых для получения фасонных литых заготовок методом литья под давлением на машинах с холодной горизонтальной камерой прессования, предложена классификация литниковых систем. Данная классификация позволяет идентифицировать тип литниковой системы по определенным геометрическим признакам подводящего канала и питателя.

2. Представленная классификация не является замкнутой, может по мере необходимости корректироваться и дополняться новыми элементами. Такой подход представляется интересным и полезным, в том числе, для решения задач автоматизированного проектирования технологических процессов данного метода литья.

3. Аналитическим путем, подтвержденным результатами моделирования литейных процессов в специализированном программном обеспечении, подтверждена применимость формул теории формирования отливки, в частности,

коэффициента тепловой аккумуляции формы для тепловых расчетов при литье под давлением.

4. Разработан алгоритм для автоматизированного расчета суммарных потерь перегрева расплава при его движении в каналах пресс-формы, оформляющих элементы литниковой системы. Данный алгоритм может быть использован для дальнейшей автоматизации тепловых расчетов при проектировании технологического процесса изготовления отливок литьем под давлением.

5. Результаты моделирования заполнения расплавом отливок различной толщины показали принципиально разный характер движения потока расплава в этих отливках и как следствие – разный характер теплообмена между расплавом и стенками пресс-формы. Для тонкостенных отливок характерно заполнение сплошным фронтом, а для толстостенных отливок сначала формируется оболочка, после чего происходит заполнение центральной их части.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК, ИЗГОТАВЛИВАЕМЫХ ЛИТЬЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

3.1. Новая методика расчета литниковых систем для тонкостенных протяженных отливок на основе решения обратной тепловой задачи

Задача нахождения значения неизвестной функции в уравнении, описывающем протекание какого-либо процесса, может быть решена двумя путями. Первый путь – когда мы задаем значения параметров, влияющих на искомую функцию, и после решения уравнения (или системы уравнений) получаем значение этой функции. Если ищется оптимум функции, то в зависимости от полученного значения функции, корректируются исходные значения параметров и расчеты повторяются.

Второй путь – когда наоборот, сначала мы задаем значение искомой функции, а затем уже, при решении уравнения, их связывающего, находим значения параметров, которые определяют заданное заранее значение этой функции. Таким образом, задачи нахождения значения неизвестной функции можно разделить на прямые (первый путь) задачи и обратные (второй путь) задачи.

Обратные задачи позволяют резко снизить временные затраты на нахождение заданного значения неизвестной функции, но их постановка связана с целым рядом проблем (физического и математического плана), которые нужно решить, чтобы такие задачи сформулировать.

Для расчета значений элементов ЛС с помощью решения обратной тепловой задачи, формулу (2.2.11) необходимо преобразовать. Сначала, для сокращения записи, разность корней длин каналов пресс-формы обозначим через $\sqrt{\Delta L_n}$:

$$\Delta T_n = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi)}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0n} \cdot \sqrt{u_n}} \cdot \sqrt{\Delta L_n} \quad (3.1.1)$$

где: $\sqrt{\Delta L_n} = \sqrt{L_1 + \dots + L_n} - \sqrt{L_1 + \dots + L_{n-1}}$.

Затем, помножим числитель и знаменатель на квадратный корень из площади поперечного сечения соответствующего канала $\sqrt{f_n}$:

$$\Delta T_n = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi) \sqrt{f_n}}{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0n} \cdot \sqrt{u_n} \sqrt{f_n}} \cdot \sqrt{\Delta L_n} \quad (3.1.2)$$

В знаменателе формулы (3.1.2) произведение скорости расплава в канале на площадь поперечного сечения канала под корнем дает расход расплава Q , который одинаков для всех каналов полости пресс-формы (допущение – рассматриваем каналы с заполненным поперечным сечением):

$$\Delta T_n = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi) \sqrt{f_n}}{\sqrt{Q} \cdot c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{0n}} \cdot \sqrt{\Delta L_n} \quad (3.1.3)$$

Если теперь сложить потери перегрева во всех каналах пресс-формы, то получим следующее выражение:

$$\sum \Delta T = \frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi)}{\sqrt{Q} \cdot c_1 \cdot \rho_1} \left[\frac{\sqrt{f_1}}{R_{01}} \sqrt{\Delta L_1} + \frac{\sqrt{f_2}}{R_{02}} \sqrt{\Delta L_2} + \dots + \frac{\sqrt{f_n}}{R_{0n}} \sqrt{\Delta L_n} \right] \quad (3.1.4)$$

И, наконец, запишем полученное выражение относительно расхода расплава:

$$Q = \left[\frac{1,13 \cdot b_\phi \cdot (T_L - T_\phi)}{\sum \Delta T \cdot c_1 \cdot \rho_1} \left[\frac{\sqrt{f_1}}{R_{01}} \sqrt{\Delta L_1} + \frac{\sqrt{f_2}}{R_{02}} \sqrt{\Delta L_2} + \dots + \frac{\sqrt{f_n}}{R_{0n}} \sqrt{\Delta L_n} \right] \right]^2 \quad (3.1.5)$$

С помощью полученной формулы (3.1.5) для расчета ЛС предлагается решать обратную тепловую задачу, алгоритм решения которой заключается в следующем.

Предварительно, полость пресс-формы разбивается на несколько, последовательно заполняемых каналов простой конфигурации (обычно в форме бруса или плиты).

Далее, на первом шаге, задается «желаемая» величина потерь перегрева расплава $\sum \Delta T$, что и определяет искомое значение температуры заливки (на первой

итерации решения обратной задачи величина перегрева расплава может быть задана на основе практического опыта).

На втором шаге, с помощью модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме (формула (3.1.5)), определяется расход расплава при заполнении расплавом только той части полости пресс-формы, которая оформляет отливку (без каналов ЛС).

На третьем шаге, зная расход расплава и назначив скорость впуска в питателе $u_{\text{пит}}$ (на первой итерации исходя из практических рекомендаций), рассчитывается площадь поперечного сечения питателя $f_{\text{пит}}$.

$$f_{\text{пит}} = \frac{Q}{u_{\text{пит}}} \quad (3.1.6)$$

На четвертом шаге, зная значение $f_{\text{пит}}$, определяются площади поперечных сечений остальных элементов ЛС (используя известные соотношения).

После расчета ЛС необходимо по формуле (2.2.11) посчитать потери перегрева во всех каналах пресс-формы (включая и каналы ЛС) и уточнить суммарные потери перегрева $\sum \Delta T$, которые закладывались на первом шаге решения обратной задачи и в которых не учитывались потери перегрева в каналах ЛС.

Если величина $\sum \Delta T$ соответствует «желаемой» величине, расчет можно считать законченным.

Если же величина $\sum \Delta T$ завышена, расчеты надо повторить, меняя способ подвода расплава к отливке или увеличивая скорость впуска в питателе.

Для сравнения существующих методик и предлагаемой методики расчета элементов ЛС, построим 3-D модель тонкостенной протяжённой отливки (рисунок 3.1.1), габариты отливки составляют: длина 300 мм, ширина 50 мм, толщина стенки 3 мм; три ребра отливки имеют толщину 3 мм, ширину 25 мм. Материал отливки примем на основе сплава алюминия – АК12.

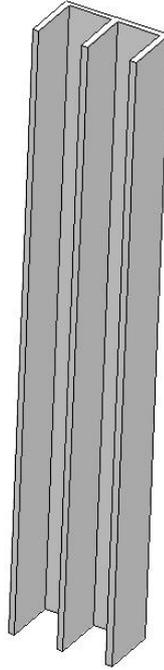


Рисунок 3.1.1 - Модель отливки

Расчёт ЛС по существующим методикам не зависит от места подвода расплава к отливке, поэтому сначала определим по каждой существующей методике площадь поперечного сечения питателя по формулам (1.2.1) ÷ (1.2.4).

По методике А.К. Белопухова, время заполнения расплавом пресс-формы составит:

$$\tau_{\text{зап}} = 0,06 \cdot 0,9 \cdot 1 = 0,054 \text{ с} \quad (3.1.7)$$

Скорость впуска:

$$v_{\text{вп}} = 15 \cdot 1,5 \cdot 1,5 = 33,4 \text{ м/с} \quad (3.1.8)$$

Площадь питателя:

$$f_{\text{пит}} = \frac{1,12 \cdot 10^{-4}}{33,4 \cdot 0,054} = 6,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = 62 \text{ мм}^2 \quad (3.1.9)$$

При толщине питателя 2,5 мм, длина составит 25 мм.

По методике Н.А. Шубина площадь питателя получается:

$$f_{\text{пит}} = \frac{1,12 \cdot 10^{-4}}{4,41} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 = 25 \text{ мм}^2 \quad (3.1.10)$$

При толщине питателя 2,5 мм, длина составит 10 мм.

По номограмме Дж. Гербера площадь питателя равна:

$$f_{\text{пит}} = 20 \text{ мм}^2 \quad (3.1.11)$$

При толщине питателя 2,5 мм, длина составит 8 мм.

Следует отметить довольно большую разницу в значении $f_{\text{пит}}$, полученной по методике А.К. Белопухова, и близкие значения, полученные по методикам Н.А. Шубина и Дж. Гербера. Для дальнейших расчетов выберем в качестве основы значение $f_{\text{пит}}$, полученной по методике А.К. Белопухова. Если в дальнейших расчетах окажется, что принятое значение $f_{\text{пит}}$ избыточное, значение можно будет скорректировать в сторону его уменьшения.

Далее, согласно этим методикам, необходимо определиться с местом подвода питателя к отливке. Для этого существует целый ряд практических рекомендаций. Наиболее оптимальными для данной отливки видятся два варианта подвода расплава к отливке. Первый вариант - расположить питатель снизу отливки по короткой стороне. Этот вариант показан на рисунке 3.1.2 а). Вторым вариантом подвода расплава к отливке - расположить питатель по центру сбоку по длинной стороне отливки (рисунок 3.1.2 б).

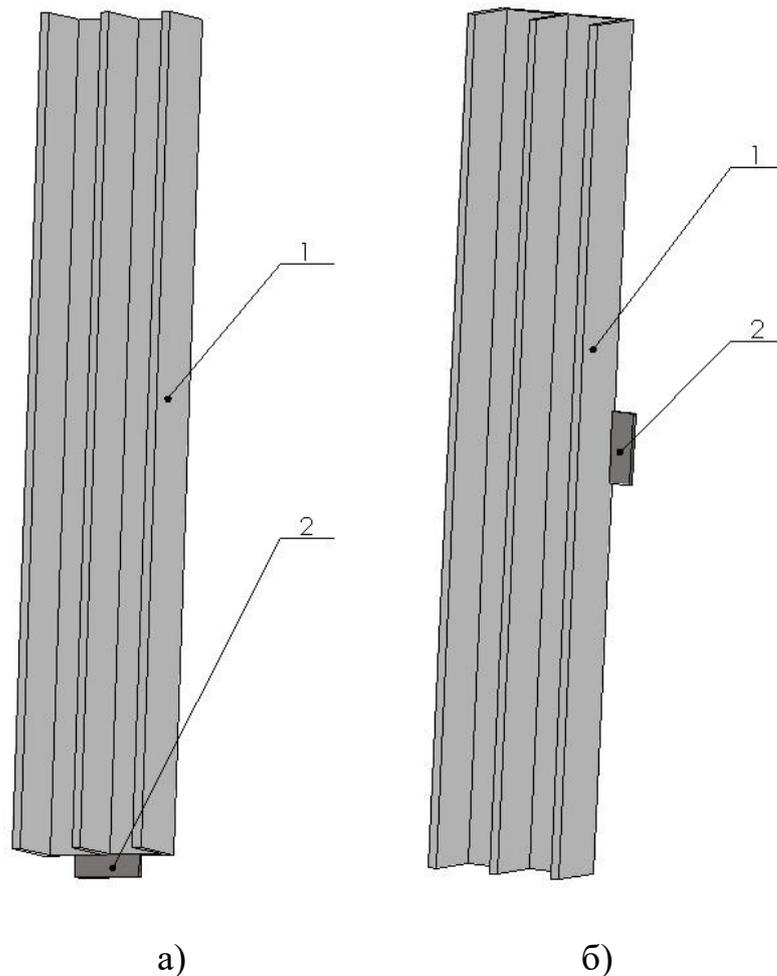


Рисунок 3.1.2 - Отливка с питателем, 1 - отливка, 2 - питатель

Когда место подвода расплава к отливке определено, рассчитываются длина и толщина питателя. Для питателя практикой установлено, что его толщина должна быть не более 0,8 от толщины стенки отливки. В нашем случае получаем толщину питателя 2,4 мм. Тогда длина питателя будет равна 26 мм.

После выбора места подвода расплава к отливке и расчета геометрии питателя, по эмпирическим зависимостям определяются размеры остальных элементов ЛС, которые в данном случае не рассматриваются.

Алгоритм расчета элементов ЛС по предлагаемой методике отличается от алгоритма, рассмотренного выше.

На первом шаге анализируется геометрия отливки и выбирается такое место подвода расплава к отливке, которое обеспечило бы минимальный путь расплава при заполнении полости пресс-формы, а значит и минимальные потери перегрева.

Возможные места подвода расплава уже были рассмотрены ранее (рисунок 3.1.2). Согласно рисунку, минимальный путь расплава будет соответствовать схеме с боковым подводом по длинной стороне отливки (рисунок 3.1.2 б). Причем расплав должен поступать одновременно по всей длинной стороне отливки.

На втором шаге отливка разбивается на отдельные каналы простой конфигурации, которые будут заполняться последовательно друг за другом в соответствии с выбранным местом подвода. Схема разделения отливки на отдельные каналы показана на рисунке 3.1.3.

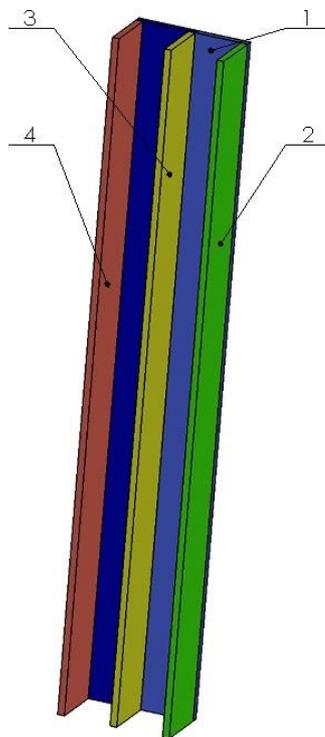


Рисунок 3.1.3 - Разбивка отливки на каналы

Согласно схеме на рисунке 3.1.3, сначала заполняется основание отливки 1, затем последовательно ребро 4, затем ребро 3 и наконец, ребро 2.

На третьем шаге задаем в первом приближении «желаемые» потери перегрева расплава $\sum \Delta T$ при заполнении полости пресс-формы. Принцип очевиден – перегрев расплава должен быть минимальным. В нашем случае зададим $\sum \Delta T$ равными 30 градусам. Далее, по формуле (3.1.5), определяется расход расплава Q при заполнении полости пресс-формы.

В качестве исходных данных для расчета примем теплофизические свойства сплава АК12 и формообразующих вставок пресс-формы из стали 4Х5МФС следующие: $c_1 = 1130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$, $\rho_1 = 2460 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, $T_L = 856 \text{ К}$, $b_\phi = 10090 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}^{0,5}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}$, $T_\phi = 473 \text{ К}$.

В результате расчетов по формуле (3.1.5) получаем значение расхода расплава Q равное $0,082 \text{ м}^3/\text{с}$.

На четвертом шаге находим площадь питателя $f_{\text{пит}}$ по формуле (1.2.1). Для этого необходимо назначить скорость впуска $v_{\text{вп}}$, исходя из практических рекомендаций. В работе [43] для литья алюминиевых сплавов значение $v_{\text{вп}}$ для рассматриваемого класса отливок рекомендуется в диапазоне $30 - 60 \text{ м/с}$. Для сравнения методик расчета ЛС примем $v_{\text{вп}} = 33,4 \text{ м/с}$, как и для методики А.К. Белопухова. С учетом принятых значений получим площадь питателя $f_{\text{пит}}$ равной $24,55 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 2455 \text{ мм}^2$. Тогда при толщине питателя $2,4 \text{ мм}$ (величина нам известная из рекомендации отношения толщины питателя к толщине отливки) получим длину питателя 1023 мм . Получившееся значение длины питателя оказалось намного больше длины отливки.

В этом случае, т.к. алгоритм расчета ЛС по новой методике является итерационным, необходимо скорректировать входные данные и расчет повторить. Согласно алгоритму, мы можем изменять значения прежде всего скорости впуска и суммарных потерь перегрева (температуры заливки). На первой итерации нами были заданы потери перегрева 30 градусов, что намного меньше практики литья под давлением. Обычно, для сложных по конфигурации тонкостенных отливок назначается перегрев расплава в интервале $60 - 100$ градусов. Поэтому, на второй итерации расчетов примем потери перегрева 60 градусов (каждый раз стремимся назначить минимально возможный перегрев).

Повторив расчет по представленному алгоритму, получим расход расплава Q равный $0,0205 \text{ м}^3/\text{с}$ и площадь питателя $f_{\text{пит}}$ равной $6,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 614 \text{ мм}^2$. Тогда, при толщине питателя $2,4 \text{ мм}$, длина питателя станет равной 256 мм . Размеры питателя уже могут быть реализованы на практике и приняты в качестве основы для дальнейшего уточнения при вычислительном моделировании.

Построим 3-D модели отливки с ЛС, посчитанной по предлагаемой методике. Получившиеся результаты представлены на рисунке 3.1.4.

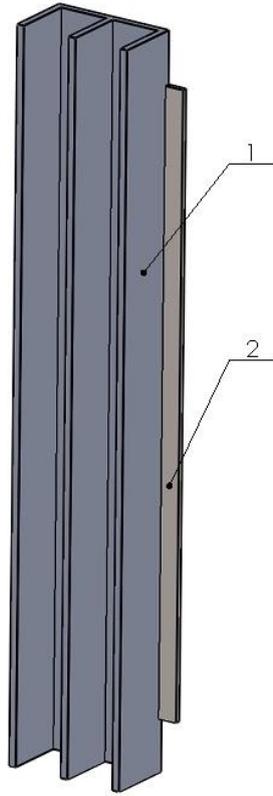


Рисунок 3.1.4 - Отливка с питателем по методике ОТЗ, 1 - отливка, 2 - питатель

Далее проведём моделирование заполнения расплавом полости пресс-формы с двумя вариантами подвода питателя по методике А.К. Белопухова и по новой методике в программе FLOW 3D. В качестве исходных данных для моделирования зададим температуру заливки $T_{зал} = 976$ К (при более высоком перегреве расплава окисляемость алюминия резко возрастает), скорость в питателе для всех трёх вариантов будем задавать одинаковой и равной $v_{вп} = 33,4$ м/с. При моделировании будем анализировать и сравнивать между собой потери перегрева при заполнении расплавом полости пресс-формы.

На рисунке 3.1.5 представлены поэтапные результаты моделирования заполнения расплавом полости пресс-формы с ЛС по методике А.К. Белопухова, с подводом расплава снизу

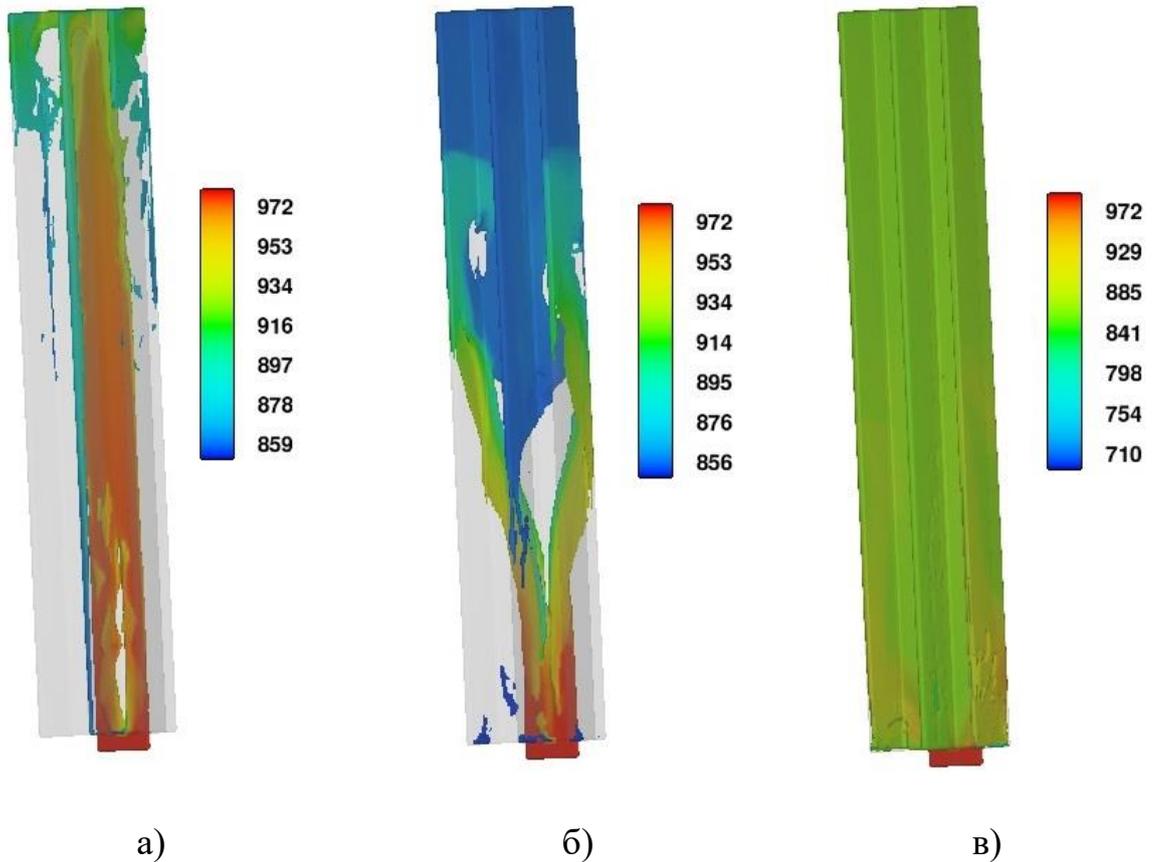
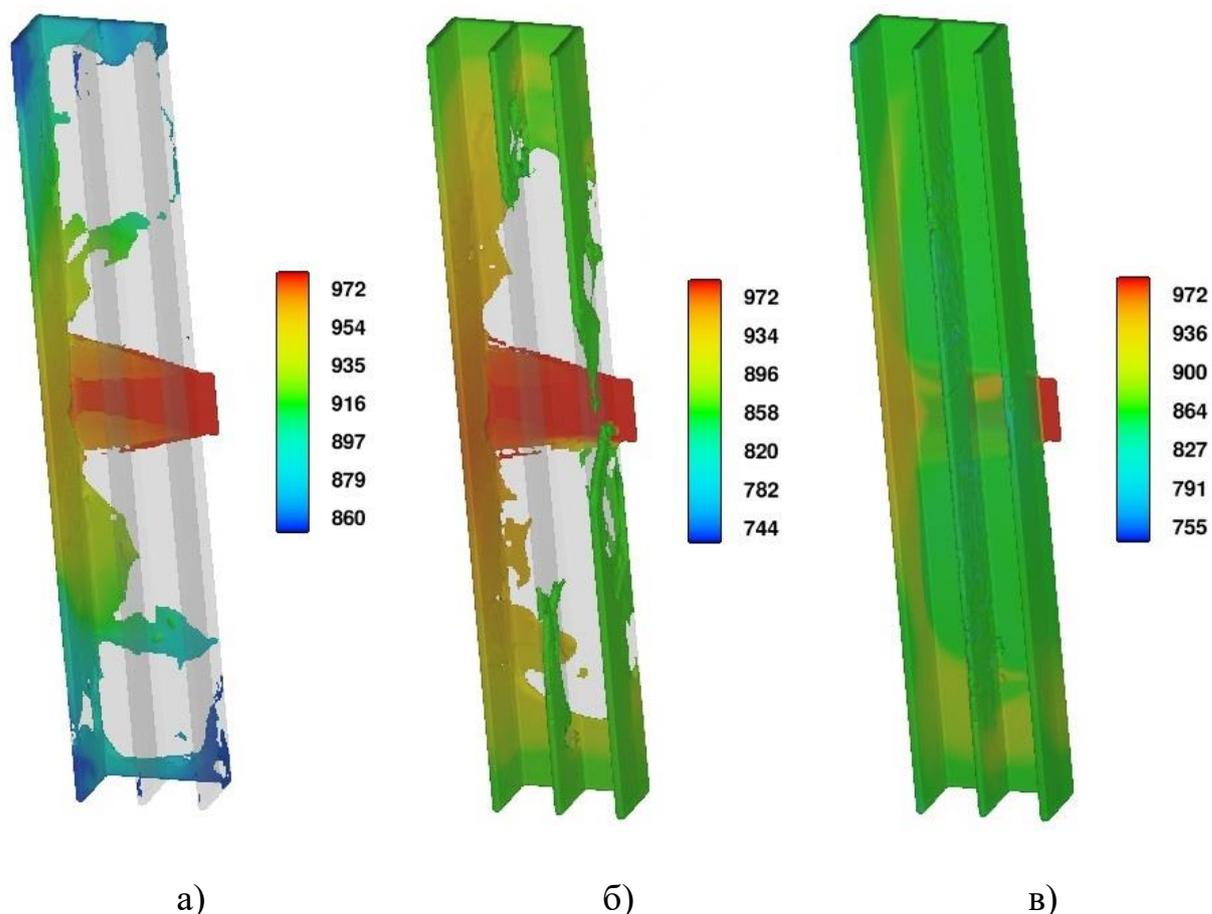


Рисунок 3.1.5 - Заполнение полости пресс-формы с нижним подводом расплава

На этом рисунке и далее дана шкала температур в градусах Кельвина. Расплавы, попадая из питателя в полость пресс-формы, поднимаются вверх по всей длине отливки и ударяются о верхнюю стенку пресс-формы (рисунок 3.1.5 а). После чего расплав, дробясь на отдельные потоки, начинает движение вниз, заполняя основание и ребра отливки. По мере движения расплава в уже заполненных частях отливки происходит затвердевание расплава (температура расплава опускается ниже температуры ликвидус). Максимальные потери перегрева на носике потока к концу заполнения превышают 130 градусов, что приводит к образованию дефектов в отливке типа неслитин и неспаев.

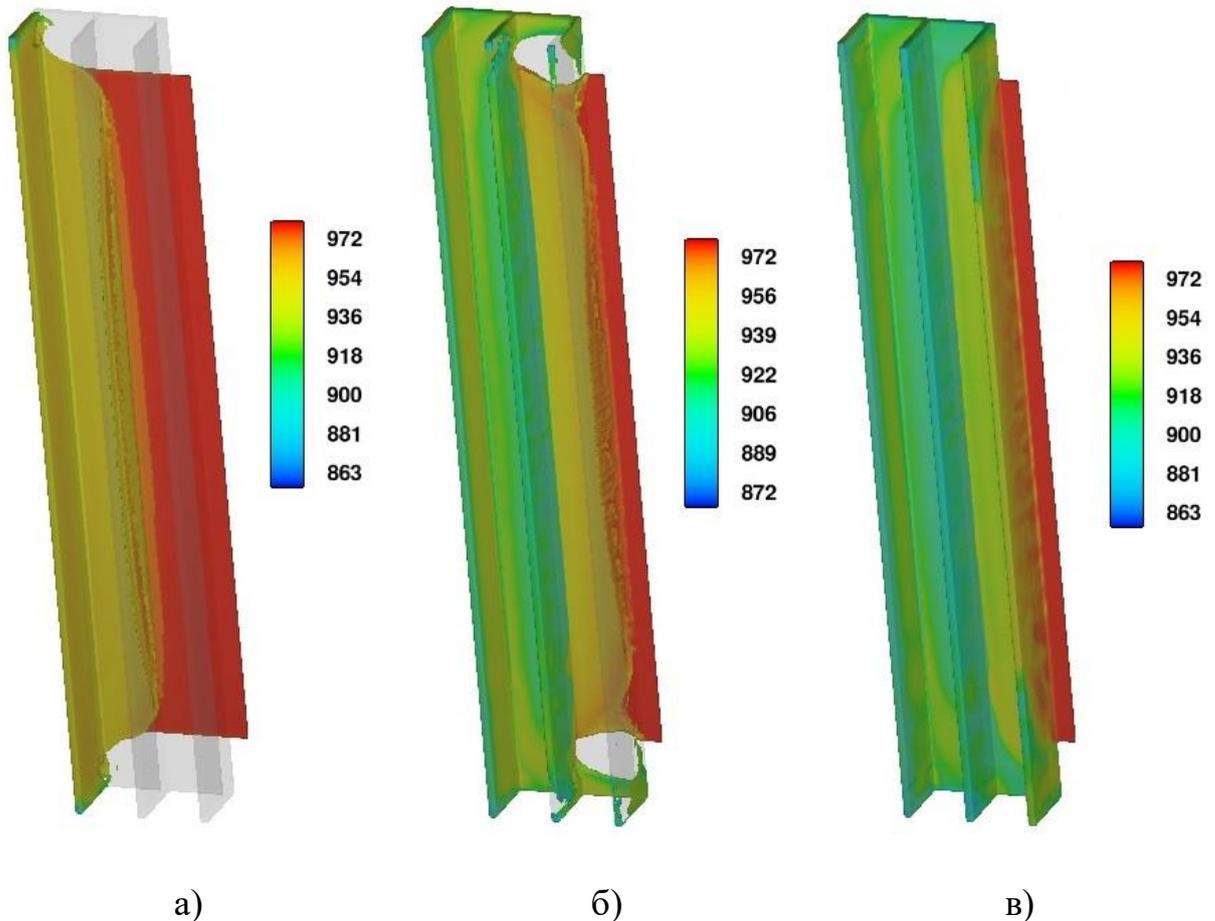
На рисунке 3.1.6 представлены поэтапные результаты моделирования заполнения расплавом полости пресс-формы с ЛС по методике А.К. Белопухова, с подводом расплава сбоку.



а) б) в)
Рисунок 3.1.6 - Заполнение полости пресс-формы с боковым подводом расплава

Здесь расплав, попадая из питателя в полость пресс-формы, проходит короткий путь и ударяется в противоположную стенку пресс-формы, после чего происходит заполнение дальнего (от питателя) ребра отливки (рисунок 3.1.6 а). Далее, начинается заполнение двух других ребер и основания, двумя потоками расплава, которые двигаются одновременно снизу и сверху друг навстречу другу. Путь движения расплава в полости пресс-формы сокращается, по сравнению со схемой на рисунке 3.1.5, и максимальные потери перегрева на носике потока к концу заполнения составляют порядка 120 градусов. Потери перегрева хоть и становятся меньше, но все равно превышают предельно допустимые, что приводит к образованию в вершинах ребер неслитин.

На рисунке 3.1.7 представлены поэтапные результаты моделирования заполнения расплавом полости пресс-формы с ЛС по предлагаемой методике.



а) б) в)
Рисунок 3.1.7 - Заполнение полости пресс-формы с подводом расплава по новой методике

По данным, показанным на рисунке 3.1.7, расплав, попадая в полость пресс-формы, сначала заполняет широким потоком основание отливки, а потом поочередно три ребра, начиная с дальнего. Причем заполнение двух последних ребер происходит более горячими порциями расплава, которые поступают из питателя, и не увеличивают потери перегрева расплава при заполнении полости пресс-формы.

В результате суммарные потери перегрева расплава составили порядка 70 градусов, что близко со значением, заданным в расчетах по предлагаемой методике. К концу заполнения температура в движущемся расплаве не опускается ниже температуры ликвидус, что гарантирует отсутствие дефектов в отливке типа неслитин и неспаев.

3.2. Определение области применения разработанной новой методики расчета литниковых систем

Как было показано в главе 2.4., характер заполнения расплавом полости пресс-формы может быть принципиально различным. Для одних отливок заполнение полости пресс-формы происходит сплошным потоком, при интенсивном теплообмене расплава со стенками пресс-формы, при котором возникают большие потери перегрева и накопление доли твердой фазы. Для других отливок заполнение расплавом полости пресс-формы происходит по принципу формирования оболочки, после чего происходит заполнение внутренней полости этой оболочки. В этом случае расплав почти не теряет перегрев, и доля твердой фазы в расплаве не образуется. Очевидно, что в первом случае необходимо учитывать потери перегрева при заполнении расплавом полости пресс-формы, такие отливки отнесем к категории тонкостенных.

Для того, чтобы определить границы применимости термина тонкостенности к отливкам, проведем серию экспериментов по моделированию выхода расплава из питателя при разном соотношении толщины питателя к толщине стенки отливки. Стандартные толщины питателей лежат в диапазоне 1-3 мм. Поэтому проведем эксперименты с тремя толщинами питателей: 1 мм, 2 мм, 3 мм. Для каждой толщины питателя смоделируем отливку со следующими толщинами стенок: больше питателя на 20%, больше питателя на 30%, больше питателя на 50%, больше питателя на 75%. Согласно рисунку 1.1.2, скорость впуска для формирования дисперсного потока для данных толщин питателя будет лежать в диапазоне от 15 м/с для питателя 3 мм, до 30 м/с для питателя 1 мм.

На рисунке 3.2.1 показано заполнение каналов в форме с питателем толщиной 1 мм. На рисунке а) толщина канала составляет 1,2 мм, на рисунке б) – 1,3 мм, на рисунке в) – 1,5 мм, на рисунке г) – 1,75 мм. Цветовая шкала показывает изменение температуры расплава.

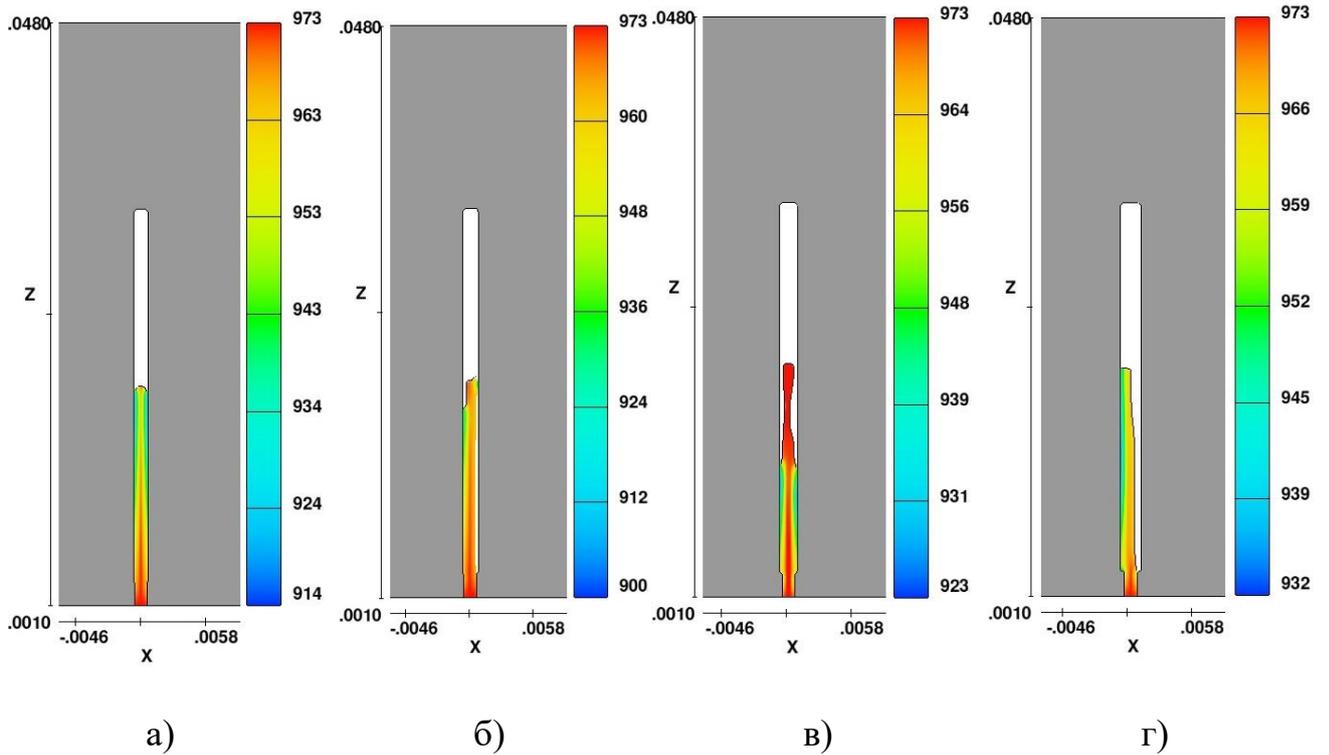
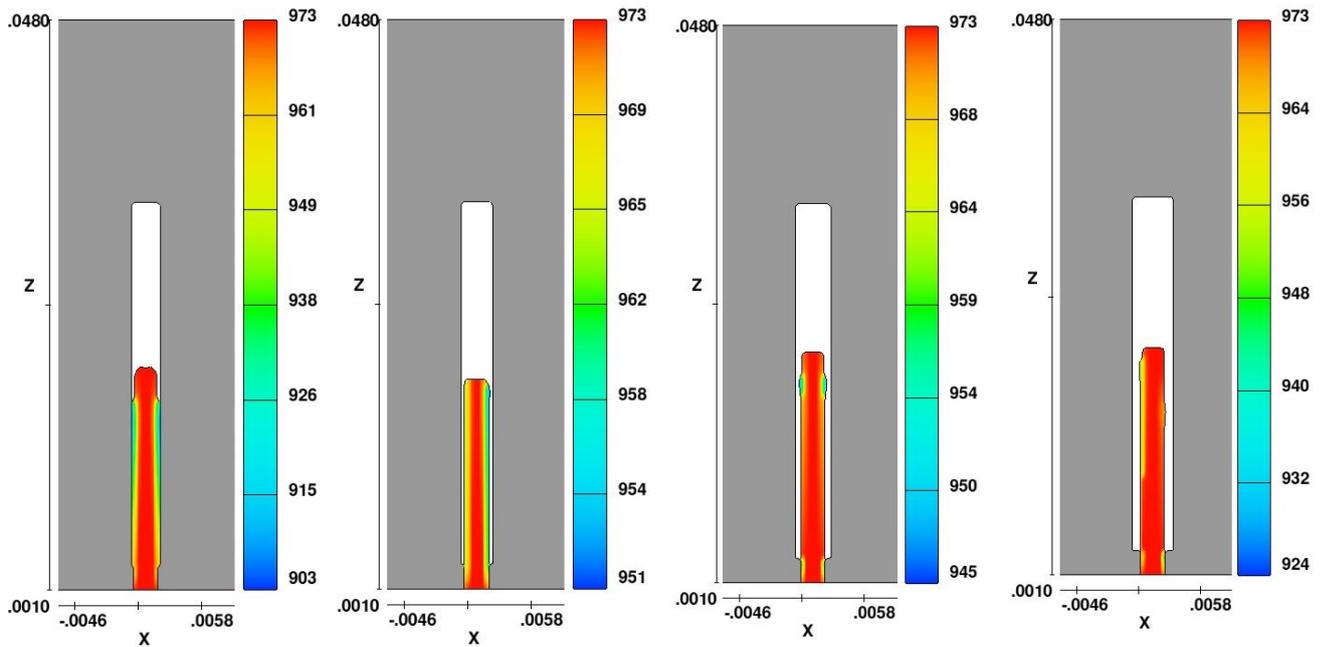


Рисунок 3.2.1 - Моделирование движение потока расплава на выходе из питателя толщиной 1 мм со скоростью 30 м/с

На рисунке 3.2.1 отчетливо видно, что при толщине канала на 20% и на 30% больше толщины питателя, расплав контактирует с вертикальными стенками канала и идет интенсивный теплообмен. А уже при превышении толщины питателя на 50% и более, первые порции расплава не касаются боковых стенок и перегрев почти не теряют.

На рисунке 3.2.2 показано заполнение каналов в форме с питателем толщиной 2 мм. На рисунке а) толщина канала составляет 2,4 мм, на рисунке б) – 2,6 мм, на рисунке в) – 3 мм, на рисунке г) – 3,5 мм. Цветовая шкала показывает изменение температуры расплава.



а)

б)

в)

г)

Рисунок 3.2.2 - Моделирование движение потока расплава на выходе из питателя толщиной 2 мм со скоростью 20 м/с

На рисунке 3.2.2 поток расплава касается боковых стенок только в канале, у которого толщина стенки больше питателя на 20%. А уже при превышении толщины питателя на 30% и более поток расплава стенок не касается и перегрев почти не теряет.

На рисунке 3.2.3 показано заполнение каналов в форме с питателем толщиной 3 мм. На рисунке а) толщина канала составляет 3,6 мм, на рисунке б) – 3,9 мм, на рисунке в) – 4,5 мм, на рисунке г) – 5,25 мм. Цветовая шкала показывает изменение температуры расплава.

отнести такие отливки, для которых необходимо учитывать потери перегрева расплава при заполнении полости отливки в пресс-форме. Т.к. показанные в главе 1.1.3. рекомендации по технологии литья указывают, что для ЛПД достаточно расплаву иметь температуру ликвидуса на выходе из питателя. Чтобы проверить это утверждение, построим уравнение регрессии: зависимость длины канала отливки от толщины стенки отливки и от скорости впуска расплава при выходе из питателя. Для этого воспользуемся методами полнофакторного эксперимента. Уравнение регрессии для двух параметров будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 \quad (3.2.1)$$

где: y - функция длины канала отливки, мм;

X_1 - первый фактор (толщина стенки отливки, мм);

X_2 - второй фактор (скорость впуска, м/с);

b_0, b_1, b_2 - коэффициенты уравнения регрессии.

Результаты влияния факторов на функцию будем получать моделированием заполнения расплавом пресс-формы в программе FLOW 3D. Сначала зададим два базовых фактора: толщину стенки отливки 2 мм, с отклонением 1 мм в каждую сторону и скорость впуска расплава 30 м/с, с отклонением 15 м/с. Температуру заливки установим равной температуре ликвидуса. Результаты сведем в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Исходные данные

Характеристика	Фактор	
	X_1	X_2
Основной уровень	2	30
Интервал варьирования	1	15
Нижний уровень	1	15
Верхний уровень	3	45

Результаты моделирования заполнения пресс-формы расплавом, т.е. насколько расплав заполнит канал $L_{отл}$ в пресс-форме при разных скоростях и толщинах представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Фактор		Результат
	X ₁	X ₂	
1	+	+	545
2	+	-	298
3	-	+	465
4	-	-	210

Проведенный статистический анализ по критериям Кохрена, Стьюдента и Фишера показал, что результаты воспроизводимы, все коэффициенты уравнения регрессии значимы и что уравнение регрессии адекватно. Итоговое уравнение регрессии имеет вид:

$$L_{\text{отл}} = 379 + 42 \cdot (\delta_{\text{отл}} - 2)/1 + 125 \cdot (u_{\text{пит}} - 30)/15 \quad (3.2.2)$$

Пользуясь данным уравнением регрессии, возможно в зависимости от толщины отливки и скорости движения расплава, определять длину канала в отливке, которую сможет заполнить расплав, прежде чем на носике потока образуется критичная доля твердой фазы и расплав остановится. Таким образом, можно определиться с термином протяженности отливки. Так, для отливки толщиной 1 мм, при скорости впуска 30 м/с, длина канала, которую сможет заполнить расплав, составляет 337 мм. Т.е. отливки длиной более 337 мм для описанных исходных данных можно отнести к категории протяженных т.е. для таких отливок необходимо учитывать потери перегрева при заполнении полости отливки.

3.3. Разработка методики выбора места подвода расплава к отливке

Как было показано в экспериментах выше, для тонкостенных протяженных отливок важно учитывать потери перегрева при заполнении полости отливки, т.к. они составляют значительную величину, по сравнению с толстостенными

отливками. В главе 2.1. приведены рекомендации по месту подвода расплава к отливке. Одно из основных требований – расплав из питателя должен поступать так, чтобы не возник сразу удар струи о стенки полости пресс-формы. Поэтому на практике стараются направить расплав по длинной стороне отливки. Однако при этом надо знать потери перегрева расплава и правильно назначить температуру заливки, иначе можно получить дефекты в отливке типа неслитин и неспаев.

Потери перегрева расплава можно определить алгоритмическими методами, например, провести моделирование заполнения расплавом пресс-формы в специализированном программном обеспечении. Но, в зависимости от конфигурации отливки, этот процесс может занимать длительное время. Поэтому, для сокращения временных затрат на расчет потерь перегрева при заполнении полости отливки в пресс-форме составим уравнение регрессии, для трех факторов: зависимость заполненной длины канала отливки от толщины стенки отливки, от скорости впуска расплава при выходе из питателя и от температуры заливки.

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 \quad (3.3.1)$$

где: y – функция заполненной длины канала отливки, мм;

X_1 - первый фактор (толщина стенки отливки, мм);

X_2 - второй фактор (скорость впуска, м/с);

X_3 - третий фактор (температура заливки, К);

b_0, b_1, b_2, b_3 - коэффициенты уравнения регрессии.

Результаты влияния факторов на функцию будем получать моделированием заполнения расплавом пресс-формы в программе FLOW 3D. Сначала зададим базовые значения факторов: толщину стенки отливки 2 мм, с отклонением 1 мм в каждую сторону, скорость впуска расплава 30 м/с, с отклонением 15 м/с и температуру заливки 944 К (перегрев 80 градусов), с отклонением 20 градусов. Результаты сведем в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Исходные данные

Характеристика	Фактор		
	X ₁	X ₂	X ₃
Основной уровень	2	30	944
Интервал варьирования	1	15	20
Нижний уровень	1	15	924
Верхний уровень	3	45	964

Результаты моделирования заполнения пресс-формы расплавом, т.е. насколько расплав заполнит канал $L_{отл}$ в пресс-форме при разных скоростях, температурах и толщинах представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Фактор			Результат, мм
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	+	+	+	921
2	+	-	+	504
3	-	+	+	818
4	-	-	+	357
5	+	+	-	709
6	+	-	-	387
7	-	+	-	629
8	-	-	-	274

Проведенный статистический анализ по критериям Кохрена, Стьюдента и Фишера показал, что результаты воспроизводимы, все коэффициенты уравнения регрессии значимы и что уравнение регрессии адекватно. Итоговое уравнение регрессии имеет вид:

$$L_{отл} = 575 + 55 \cdot \frac{(\delta_{отл} - 2)}{1} + 194 \cdot \frac{(u_{пит} - 30)}{15} + 75 \cdot (T_{зал} - 943)/20 \quad (3.3.2)$$

Пользуясь данным уравнением регрессии возможно, в зависимости от толщины отливки, скорости движения расплава и температуры заливки, определять длину канала в отливке, которую сможет заполнить расплав, прежде чем на носике потока образуется критическая доля твердой фазы и расплав остановится. Т.е. зная длину и толщину отливки, возможно варьировать параметрами скорости впуска и температуры заливки для обеспечения заполнения отливки при выбранном месте подвода расплава.

Так, для примера отливки с толщиной стенки 2 мм, при скорости впуска 20 м/с и температуре заливки 650 °С (923 К) получим, что длина отливки, которую заполнит расплав, составит 371 мм. Т.е. если отливка в длину больше 371 мм и питатель располагать так, чтобы расплав проходил всю длину отливки, то для её заполнения необходимо будет менять либо скорость впуска, либо температуру заливки. Или менять место подвода питателя и его конфигурацию.

3.4. Выводы по третьей главе

1. Для получения бездефектных протяженных тонкостенных отливок методом литья под давлением, можно рассчитать ЛС исходя из тепловой теории литья, построенной на модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме. Для расчёта ЛС решается обратная тепловая задача, когда, задавая минимальные значения потерь перегрева расплава, определяется площадь поперечного сечения питателя и других элементов ЛС.

2. Преимущество новой методики по сравнению с общепринятой заключается в том, что можно получить более точные значения элементов ЛС для каждой отливки индивидуально, а не по эмпирическим данным для групп отливок. Кроме того, в новой методике обеспечивается расчет, как расходных характеристик ЛС, так и тепловых потерь при заполнении расплавом полости пресс-формы.

3. Проведенные эксперименты подтвердили возможность использования методики, основанной на решении обратной тепловой задачи (ОТЗ), для расчёта литниковых систем, применительно к тонкостенным протяженным отливкам, изготавливаемым литьем под давлением. Результаты, полученные по методике ОТЗ, оказались существенно лучше для данной категории отливок, как по характеру заполнения расплавом полости пресс-формы, так и по требуемой более низкой температуре заливки.

4. На основе вычислительных экспериментов определены геометрические соотношения и технологические параметры, при которых отливки можно

отнести к классу «тонкостенных протяженных». Для таких отливок будет характерно заполнение полости пресс-формы сплошным фронтом расплава, с интенсивным теплообменом между расплавом и стенками пресс-формы.

5. Разработана методика выбора места подвода расплава к отливке. Методика основана на использовании уравнения регрессии, полученного на основе вычислительного полного трехфакторного эксперимента, которое позволяет оценить, будет ли заполнена отливка при выбранном месте его подвода к отливке, в зависимости от заданных значений скорости впуска и температуры заливки.

4. РАЗРАБОТКА ПРАКТИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ОТЛИВОК

4.1. Проектирование и изготовление пресс-формы для отливки «Радиатор»

Экспериментальная часть работы заключалась в проектировании, изготовлении и последующем испытании пресс-формы для тонкостенной протяжённой отливки «Радиатор» из алюминиевого сплава АК12, получаемой методом литья под давлением, с минимальной толщиной стенки 0,8 мм на длине 500 мм. На рисунке 4.1.1 показана 3-D модель отливки «Радиатор».

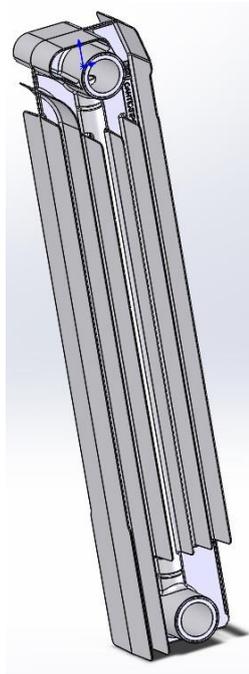


Рисунок 4.1.1 – Отливка «Радиатор»

Для этой отливки была построена трехмерная математическая модель и плоский чертеж в пакете программ SolidWorks; рассчитана и спроектирована литниково-питающая система; смоделированы процессы заполнения расплавом пресс-

формы и кристаллизации расплава в форме в программе FLOW 3D; разработана конструкция 2-х гнездной пресс-формы [115-121]; построены трехмерные математические модели и плоские чертежи на детали пресс-формы и на сборку пресс-формы в пакете программ SolidWorks [122], по разработанным чертежам и трехмерным математическим моделям изготовлена пресс-форма; были проведены испытания изготовленной пресс-формы на машине литья под давлением, в процессе которых были проверены полученные теоретически зависимости в исследовательской части работы и подобраны параметры литья для получения годных отливок.

Для расчета ЛС применялся новый алгоритм, описанный в главе 3.1. На первом шаге была проанализирована геометрия отливки и выбрано место подвода расплава к отливке, обеспечивающее минимальный путь расплава при заполнении полости пресс-формы, а значит и минимальные потери перегрева. Минимальный путь расплава будет при расположении питателя по длинной стороне отливки. Причем расплав должен поступать одновременно по всей длинной стороне отливки, как показано на рисунке 4.1.2.

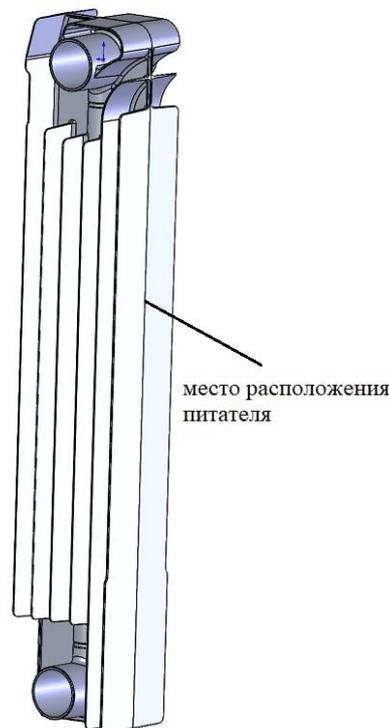


Рисунок 4.1.2 – Место расположения питателя

На втором шаге отливка была разбита на отдельные каналы простой конфигурации, которые будут заполняться последовательно друг за другом в соответствии с выбранным местом подвода. Схема разделения отливки на отдельные каналы показана на рисунке 4.1.3.

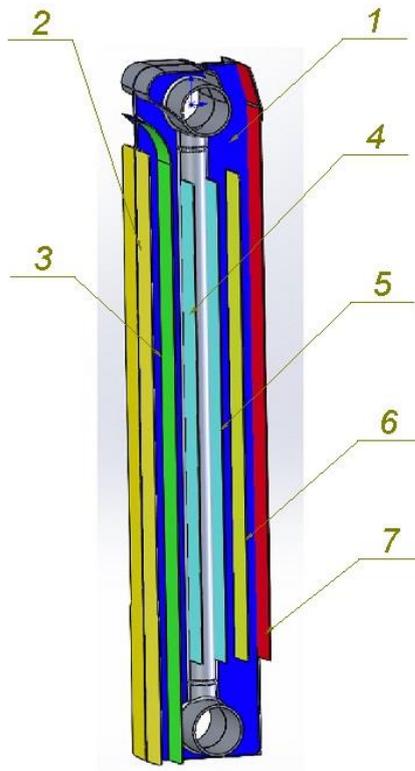


Рисунок 4.1.3 - Разбивка отливки на каналы

Согласно схеме на рисунке 4.1.3, сначала заполняется основание отливки 1, затем последовательно ребро 2, затем ребро 3, ребро 4, ребро 5, ребро 6, ребро 7.

На третьем шаге задаем желаемые потери перегрева расплава $\sum \Delta T$ при заполнении полости пресс-формы. Принцип очевиден – перегрев расплава должен быть минимальным. В нашем случае зададим $\sum \Delta T$ равными 50 градусам. Далее, по формуле (3.2.5), определяется расход расплава Q при заполнении полости пресс-формы.

В качестве исходных данных для расчета примем теплофизические свойства сплава АК12 и формообразующих вставок пресс-формы из стали 4Х5МФС следующие:

$$c_1 = 1130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}, \rho_1 = 2460 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, T_L = 856 \text{ К}, b_\phi = 10090 \frac{\text{Вт}\cdot\text{с}^{0,5}}{\text{м}^2\cdot\text{К}}, T_\phi = 473 \text{ К}.$$

В результате расчетов по формуле (3.1.5) получаем значение расхода расплава Q равное $0,025 \text{ м}^3/\text{с}$.

На четвертом шаге находим площадь питателя $f_{\text{пит}}$ по формуле (3.1.6). Для этого необходимо назначить скорость впуска $v_{\text{вп}}$, исходя из практических рекомендаций. В работе [43] для литья алюминиевых сплавов значение $v_{\text{вп}}$ для рассматриваемого класса отливок рекомендуется в диапазоне $30 - 60 \text{ м/с}$, примем $v_{\text{вп}} = 40 \text{ м/с}$. С учетом принятых значений получим площадь питателя $f_{\text{пит}}$ равной $6,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 630 \text{ мм}^2$. Тогда при толщине питателя $1,2 \text{ мм}$ получим длину питателя 530 мм . Далее необходимо определить площадь поперечного сечения подводящего канала. Общепринятые рекомендации связывают площадь питателя и площадь подводящего канала. В случае с применением методики, основанной на решении обратной тепловой задачи, площадь поперечного сечения подводящего канала получилась бы слишком большой, поэтому преобразуем формулу (1.2.5) через коэффициенты $K_1 - K_4$:

$$F_{\text{пк}} = (1,2 \dots 1,5) \cdot \frac{V_{\text{отл}}}{0,9 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4} \quad (4.1.1)$$

Получаем значение площади поперечного сечения подводящего канала 490 мм^2 , размеры подводящего канала проектируем $13 \times 40 \text{ мм}$. Следующим шагом были спроектированы промывники – элементы для фильтрации первых порций расплава, содержащих смазку, через которые были выполнены вентиляционные каналы по плоскости разъема пресс-формы. Учитывая требуемую серийность изготовления отливки «Радиатор», пресс-форму будем проектировать двухгнездную. Тогда для двухгнездной пресс-формы подбираем машину ЛПД по усилию запираения. Усилие запираения определяем по формуле (1.2.9), оно составит $10\,800 \text{ кН}$, т.е. для данной пресс-формы подойдет машина ЛПД серии 71112 с усилием запираения $12\,500 \text{ кН}$. Далее по формуле (1.2.11) определяем диаметр камеры прессования, получаем значение 124 мм , округляем его до ближайшего стандартного значения камеры прессования 120 мм . После чего проверяем значение скорости прессового поршня для расчетных значений питателя и диаметра камеры прессования, при

заданной скорости впуска по формуле (1.2.13). Получаем значение скорости прес-сового поршня 1,9 м/с. Отливка со спроектированной ЛПС показана на рисунке 4.1.4.

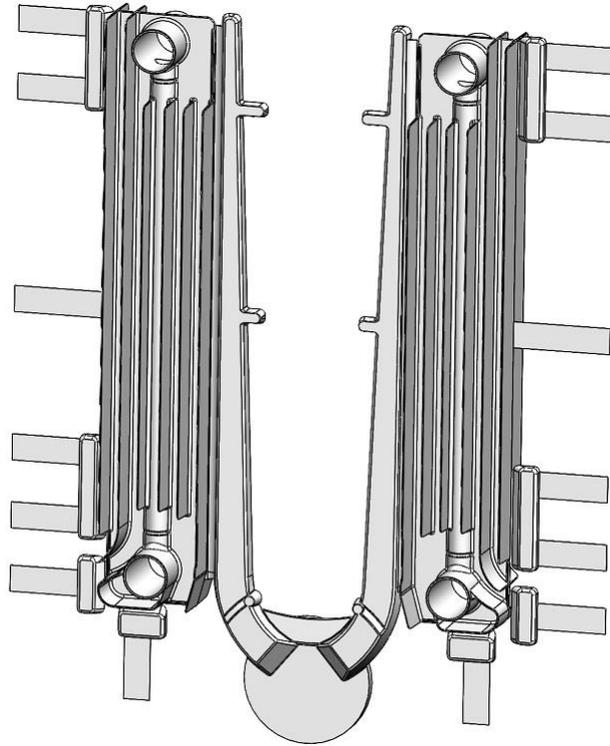


Рисунок 4.1.4 – 3-D модель отливки «Радиатор» с литниковой системой

После проектирования ЛС для отливки была проведена проверка работоспособности ЛС, моделированием процесса заполнения расплавом пресс-формы. Для моделирования литейных процессов применялась программа FLOW 3D, анализировались параметры скорости расплава, потерь перегрева при заполнении расплавом пресс-формы, замешивание воздуха, для предотвращения возникновения возможных литейных дефектов [123-125]. Результаты расчетов в программе FLOW 3D приведены на рисунках 4.1.5, 4.1.6.

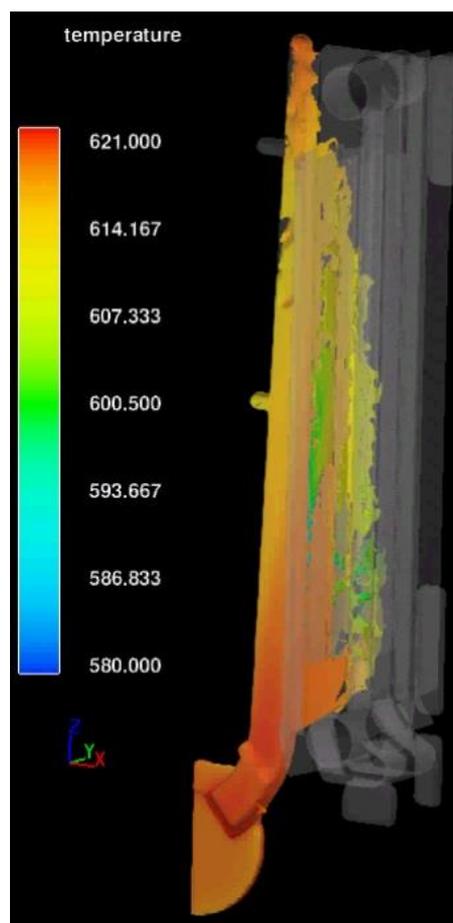


Рисунок 4.1.5 – Моделирование заполнения расплавом пресс-формы

Для уменьшения времени моделирования, расчет проводился по одному гнезду пресс-формы, что позволяет существенно сократить время расчета. Как видно на рисунке 4.1.5, расплав, заполнив подводящий канал, начинает фронтом заполнять полость отливки. При этом происходит интенсивный теплообмен между расплавом и пресс-формой, что видно по потерям перегрева. Моделирование процесса заполнения расплавом пресс-формы в программе FLOW 3D подтвердило заданное при расчете площади поперечного сечения питателя значение потерь перегрева в 50 градусов. Соответственно, выбранные значения сечений ЛС в корректировке не нуждаются. На рисунке 4.1.6 показано замешивание воздуха в отливку.

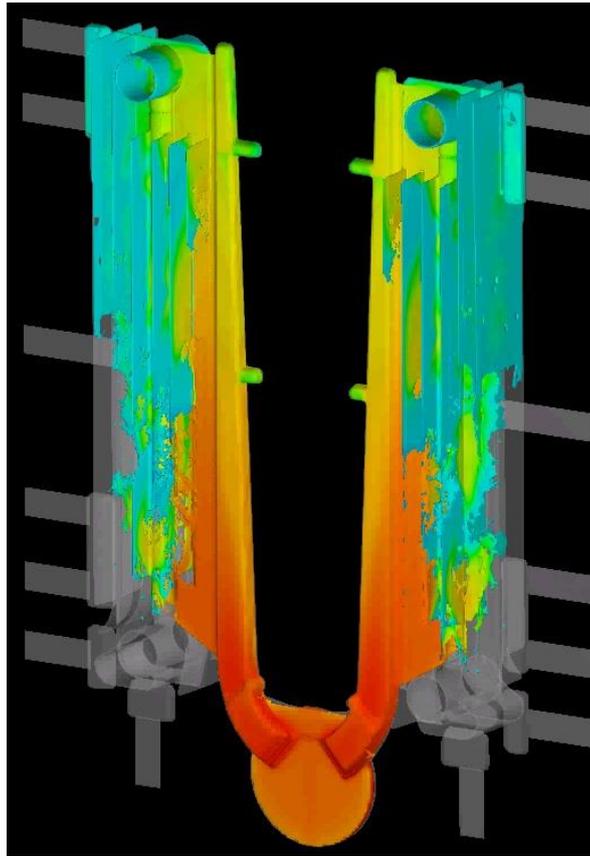


Рисунок 4.1.6 – Моделирование замешивания воздуха в расплав

Как видно, при заполнении подводящего канала и питателя, воздух вытесняется расплавом в полость пресс-формы и вытесняется через вентиляционные каналы. Однако, когда расплав начинает заполнять полость пресс-формы, верхние вентиляционные каналы оказываются перекрытыми, а скорость вытеснения воздуха оказывается существенно ниже скорости заполнения расплавом полости пресс-формы, поэтому воздух замешивается в расплав и попадает в оливку. Теоретически, возможно добавить еще несколько промывников по длинной стороне отливки напротив питателя, с дополнительными каналами для отвода воздуха. Но, полностью проблему это все-равно не решит, т.к. в конце заполнения расплавом формы воздух собирается в нижней части отливки, где уже расположено максимально возможное количество промывников. В случае возникновения дефектов, связанных с замешиванием воздуха в расплав, дальнейшие меры планируется принимать технологические – варьированием скоростью прессового поршня.

Результаты моделирования подтвердили пригодность спроектированной ЛС для получения бездефектной отливки. После чего были разработаны 3-D модели

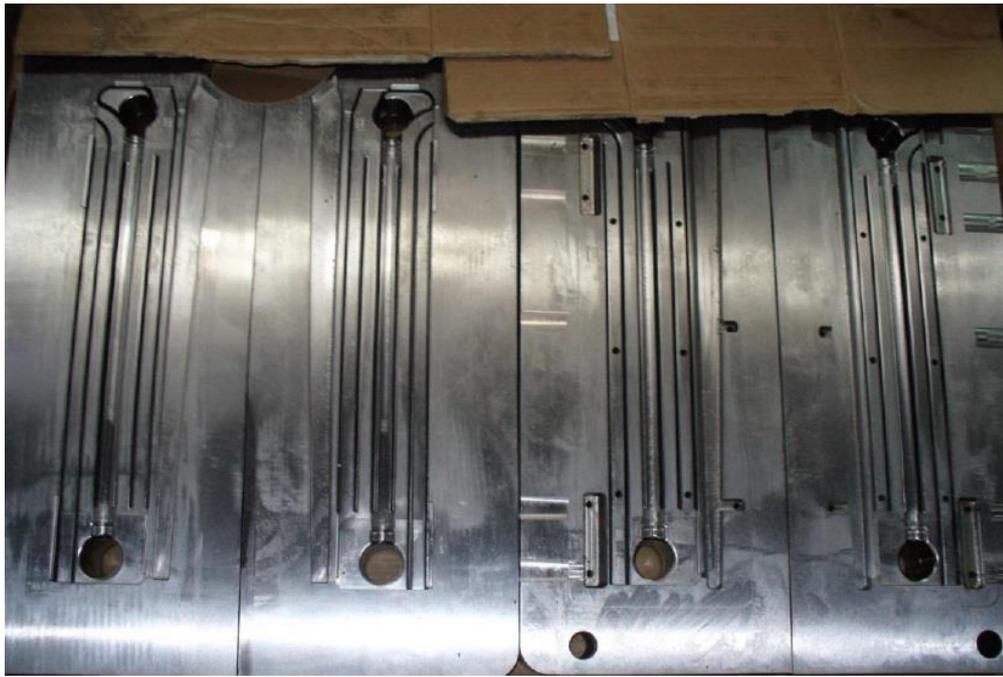


Рисунок 4.1.9 – Фотография формообразующих вставок пресс-формы

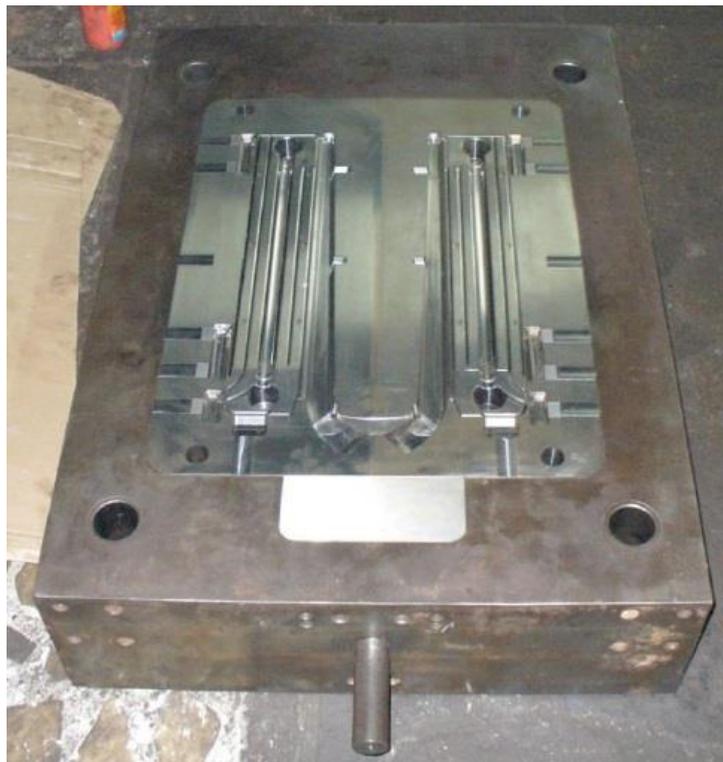


Рисунок 4.1.10 – Фотография обоймы с формообразующими вставками
пресс-формы

После этого, были проведены практические испытания получения отливок по изготовленной пресс-форме на машине ЛПД, были подобраны настройки

машины, при которых бы получались годные отливки. Практические испытания проходили на ООО «РосАЛит», г Заволжье.

Испытания пресс-формы проводились на машине ЛПД с усилием запираия 12 500 кН, усилием прессования 1 250 кН, оборудованной 4-х контурной системой термостатирования, автоматическими смазчиком, заливщиком и съемщиком отливки. На рисунках 4.1.11, 4.1.12, 4.1.13 показана установленная пресс-форма на машину литья под давлением.



Рисунок 4.1.11 – Неподвижная полуформа



Рисунок 4.1.12 – Неподвижная и подвижная полуформы



Рисунок 4.1.13 – Подвижная полуформа

Испытания показали, что при скорости прессового поршня меньше 3,5 м/с расплав не успевает заполнить тонкие ребра отливки, и возникают дефекты в виде недоливов, неспаев и неслитин. При повышении скорости до 4 м/с литейные дефекты исчезают. При скоростях больших 4 м/с наблюдается прилипание расплава к пресс-форме, подклинивание пресс-поршня и появляется облой по разьему формы.

На рисунках 4.1.14, 4.1.15, 4.1.16 показаны дефекты в отливках. На рисунке 4.1.17 показана годная отливка.



Рисунок 4.1.14 – Недоливы и пористость по всей отливке

Практические испытания подтвердили результаты моделирования в программе FLOW 3D – воздух не успевает полностью вытесниться расплавом из пресс-формы и при расчетной скорости прессового поршня проявляется в виде поверхностных дефектов, которые показаны крупным планом на рисунках 4.1.15 и 4.1.16.



Рисунок 4.1.15 – Недоливы и пористость по нижней голове отливки

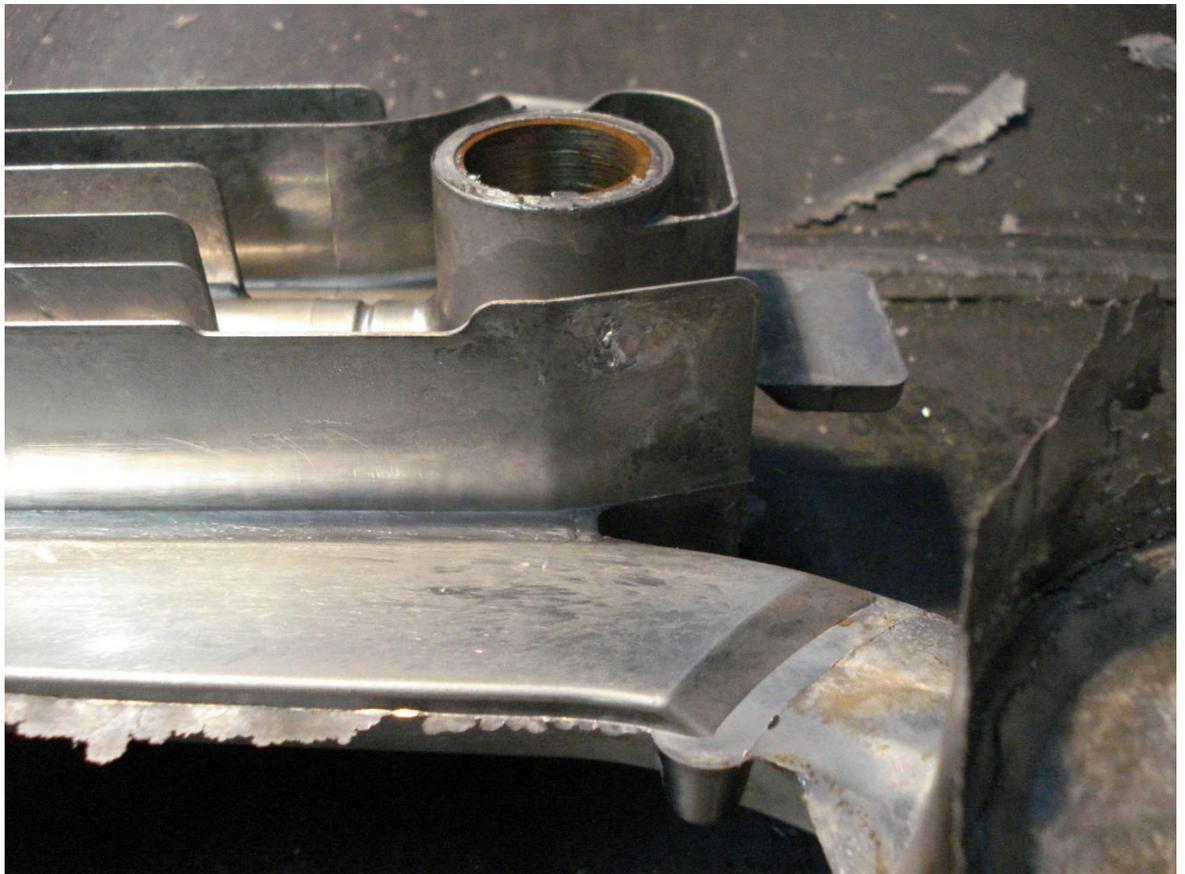


Рисунок 4.1.16 – Один неспай на ребре внизу головы

Для исключения данных дефектов было принято решение повысить скорость прессового поршня, чтобы расплав быстрее заполнял отливку и воздух не проявлялся в виде поверхностных дефектов, а распределялся равномерно по полости отливки в виде микропор. Это технологическое решение дало результат и в итоге были получены годные отливки без поверхностных дефектов. Фотография бездефектной тонкостенной протяженной отливки показана на рисунке 4.1.17.



Рисунок 4.1.17 – Годная отливка

Таким образом, практические испытания пресс-формы для отливки «Радиатор» показали применимость разработанной методики для расчета ЛПС для тонкостенных протяженных отливок.

4.2. Алгоритм и программа для автоматизированного определения потерь перегрева расплава в элементах литниковой системы

Как уже было отмечено в первой и второй главе, суммарные потери перегрева расплава при ЛПД складываются из: потерь перегрева в разливочном ковше $\Delta T_{\text{ковш}}$, потерь перегрева в камере прессования $\Delta T_{\text{КП}}$, потерь перегрева в литниковой системе $\Delta T_{\text{ЛС}}$ и потерь перегрева в полости отливки $\Delta T_{\text{отл}}$ (глава 1.1.1.). Определение потерь перегрева в разливочном ковше и камере прессования не составляет больших трудностей, т.к. наработан большой опыт и рекомендации [43, 4]. При решении обратной тепловой задачи, потери перегрева в полости отливки будут задаваться как исходные данные. Остается неизвестным одно слагаемое суммарных потерь перегрева расплава – это потери перегрева в литниковой системе. В зависимости от длины элементов ЛС, потери перегрева могут составлять существенную величину от суммарных потерь, которую надо учитывать при назначении температуры заливки. Для того, чтобы сэкономить время технолога и не считать вручную потери перегрева в ЛС для каждого конкретного случая, возможно этот процесс автоматизировать. В главе 2.3. был разработан алгоритм определения потерь перегрева, с учетом выделения тепла за счет сил трения. На базе этого алгоритма составим программу для расчета потерь перегрева в элементах ЛС, в привязке к классификации каналов ЛС, изложенной в главе 2.1.

Функционал работы программы следующий. На первом этапе задается вид литниковой системы, в соответствии с классификацией ЛС из главы 2.1. Далее вводятся начальные данные для расчета: материал сплава и пресс-формы, в зависимости от этого учитываются разные теплофизические свойства материалов; задаются геометрические размеры стандартных элементов ЛС - камеры прессования (пресс-остатка), подводящего канала и питателя; а также скорость расплава в питателе. Помимо этого, задается количество каналов, расположенных перед питателем, и учитываются комбинация их геометрических параметров: размеры, повороты, углы поворотов, сужения, расширения, раструб.

Окно программы для ввода исходных данных показано на рисунке 4.2.1.

Расчет потерь перегрева алюминиевого расплава в каналах прессформы при ЛПД

Сплав
 АК12
 АК12М2
 АК7ч

Радиус камеры прессования (КП), мм: 30 Длина КП, мм: 100

Высота вертикального подводящего канала (ВПК), мм: 10 20 100

Материал формы
 Углеродистая сталь
 4Х5МФС
 3Х2В8Ф

Высота горизонтального подводящего канала (ГПК), мм: 7 15 20

Средняя высота питателя, мм: 2 Средняя ширина питателя, мм: 15 Длина питателя, мм: 20

Скорость течения расплава в питателе, м/с: 30 Начальная температура прессформы, град.С: 200

Количество участков на пути течения расплава: 3 **Шаг 1**

Отношение площадей сечений каналов при их резком сужении

№ элемента	0.2	0.4	0.6	0.8
1	1	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	1	0	0

Формализация геометрии канала

№ элемента	Поворот	Сужение	Расширение	Раструб
1	1	1	0	0
2	0	0	1	0
3	0	1	0	0

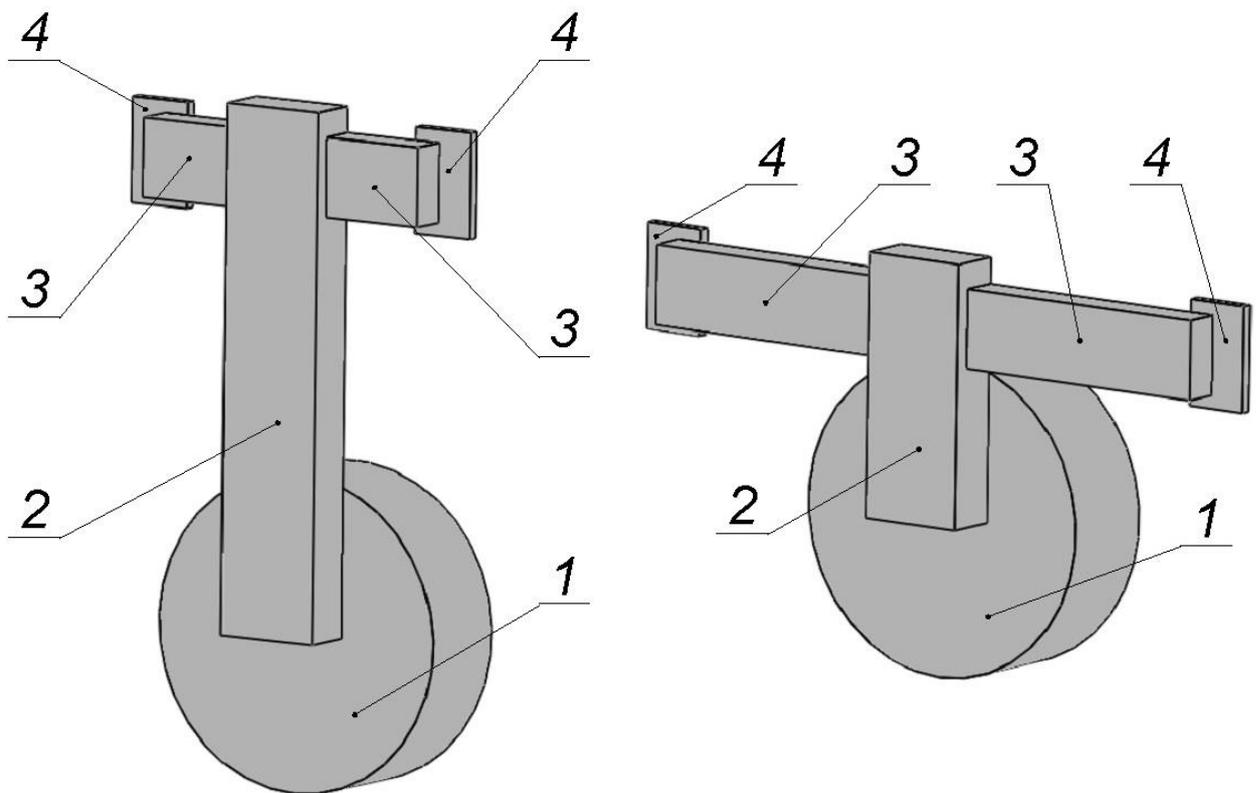
Шаг 2 **Шаг 3** **Расчет** **Закрывать**

Рисунок 4.2.1 - Интерфейс программы для автоматизированного расчета

Помимо потерь перегрева в каналах, увеличения температуры за счет сил трения в каналах, программа позволяет также рассчитать скорость расплава в каждом канале и число Рейнольдса, для оценки характера движения потока (ламинарный, турбулентный, дисперсный).

Для проверки работоспособности программы возьмем несколько примеров. Из всей гаммы возможных вариантов ЛС для ЛПД наиболее часто встречаются следующие разновидности. Питатель, как правило, проектируют в форме прямоугольника, что соответствует форме «прямой» на рисунке 2.1.1. А подводящий канал – прямой вертикальный и прямой горизонтальный. Для усложнения задачи возьмем для расчетов ЛС для двухгнездной пресс-формы. Тогда у нас получатся две литниковые системы по классификации, приведённой в главе 2.1: ЛС с прямым

вертикальным подводящим каналом и прямыми питателями, и ЛС с прямым горизонтальным литниковым каналом и прямыми питателями. Построим 3-D модели данных вариантов литниковых систем, результаты можно увидеть на рисунке 4.2.2. На рисунке 4.2.2 а) показана ЛС с прямым вертикальным подводящим каналом и прямыми питателями. На рисунке 4.2.2 б) показана ЛС с горизонтальным подводящим каналом и прямыми питателями. Цифрами на рисунке 4.2.2 обозначены: 1 – пресс-остаток, 2 – вертикальный канал, 3 – горизонтальные каналы, 4 – питатели.



а)

б)

Рисунок 4.2.2 - Типовые ЛС для автоматизированных тепловых расчетов

Размеры элементов ЛС на рисунке 4.2.2 а) составляют: пресс-остаток – 60 мм, вертикальный подводящий канал – 20x10x100 мм, горизонтальные подводящие каналы – 15x7x20 мм, питатели – 20x2x12 мм. Размеры элементов ЛС на рисунке 4.2.2 б) составляют: пресс-остаток – 50 мм, вертикальный подводящий канал – 20x10x50 мм, горизонтальные подводящие каналы – 15x7x50 мм, питатели – 20x2x12 мм.

Результаты расчетов потерь перегрева программой для ЛС представленной на рисунке 4.2.2 а) составляют 28 градусов, а донагрев в каналах за счет сил трения

составляют 2 градуса. Результаты расчетов потерь перегрева программой для ЛС представленной на рисунке 4.2.2 б) составляют 27 градусов, а донагрев в каналах за счет сил трения составляют 3 градуса.

Для сравнения результатов вычисления потерь перегрева разработанной программой, проведем моделирование заполнения расплавом полости формы в программе FLOW 3D. На рисунке 4.2.3 показаны результаты моделирования для ЛС с прямым вертикальным подводящим каналом и прямыми питателями, (рисунок 4.2.3 а) и для ЛС с прямым горизонтальным подводящим каналом и прямыми питателями, (рисунок 4.2.3 б).

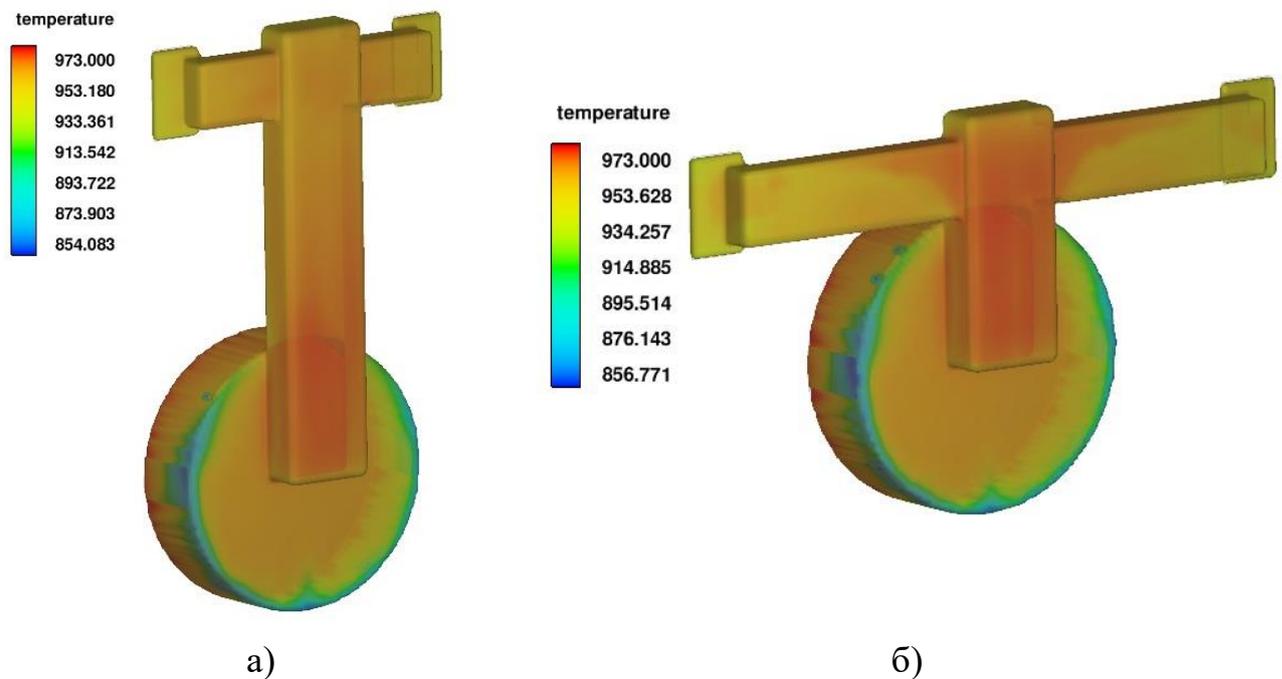


Рисунок 4.2.3 - Результаты моделирования элементов ЛС во FLOW 3D

Сравнение результатов моделирования, полученных расчетом разработанной программой и во FLOW 3D показаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнение потерь перегрева в элементах ЛС

Разновидность ЛС	Значение потерь перегрева, град	
	Разработанная программа	FLOW 3D

С прямым вертикальным каналом	17	23
С прямым горизонтальным каналом	19	24

Результаты расчета потерь перегрева в написанной программе дают схожие результаты с моделированием во FLOW 3D, с некоторой погрешностью, но с существенно меньшими временными затратами, т.к. не надо строить 3-D модели и проводить моделирование процесса заполнения расплавом пресс-формы. Поэтому, в целом можно сказать, что разработанная программа может быть применима для автоматизации определения потерь перегрева в стандартных каналах ЛС для ЛПД.

Код программы приведен в приложении Б.

4.3. Выводы по четвертой главе

1. На основе разработанной новой методики расчета значений элементов ЛС и на основе разработанной методики выбора места подвода расплава к отливке была спроектирована литниковая система для отливки «Радиатор». Вычислительное моделирование заполнения расплавом полости пресс-формы отливки «Радиатор» подтвердило корректность рассчитанных значений элементов литниковой системы.

2. Результаты практических испытаний изготовленной пресс-формы для отливки «Радиатор» показали адекватность расчетных данных практике. Выбор параметров технологического режима литья и рассчитанные значения элементов литниковой системы позволили получить на производстве отливку «Радиатор» без дефектов и со свойствами, отвечающими техническому заданию.

3. Разработана программа для автоматизированного расчета потерь перегрева в различных литниковых системах. Алгоритм расчета основан на модели малой интенсивности охлаждения и, помимо теплового взаимодействия отливки и пресс-формы, учитывает дополнительный нагрев расплава и пресс-формы за счет сил трения. Программа позволяет получить более точный результат по сравнению с классическим тепловым расчетом и позволяет технологу сократить время на

вычисление потерь перегрева, а также создать базу типовых литниковых систем с известными параметрами.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Предложена классификация литниковых систем для литья под давлением. Данная классификация позволяет идентифицировать тип литниковой системы по определенным геометрическим признакам подводящего канала и питателя. Для разных вариантов литниковых систем, указанных в предлагаемой классификации, приведены примеры их обоснованного выбора и применения к разным категориям отливок. Данная классификация может быть использована при автоматизированном проектировании технологического процесса литья под давлением.

2. На основе экспериментальных данных и теоретических выкладок доказана правомерность использования модели малой интенсивности охлаждения отливки в форме для расчетов тепловых потерь при заполнении расплавом полости пресс-формы при литье под давлением. Аналитическим путем, подтвержденным результатами моделирования литейных процессов в специализированном программном обеспечении, подтверждена применимость формул теории формирования отливки, в частности, коэффициента тепловой аккумуляции формы, для тепловых расчетов при литье под давлением

3. Разработан алгоритм для автоматизированного расчета суммарных потерь перегрева расплава при его движении в каналах пресс-формы, оформляющих элементы литниковой системы. Данный алгоритм может быть использован для дальнейшей автоматизации тепловых расчетов при проектировании технологического процесса изготовления отливок литьем под давлением.

4. Разработана новая методика для расчета значений элементов литниковой системы для тонкостенных протяженных отливок при литье под давлением. Новая методика создана на основе преобразованного уравнения малой интенсивности охлаждения отливки в форме, решение которого связано с решением обратной тепловой задачи. Применение новой методики расчета значений элементов ЛС позволяет существенно уменьшить время на поиск решений, обеспечивающих

минимально возможные потери перегрева расплава при заполнении полости пресс-формы.

5. На основе вычислительных экспериментов определены геометрические соотношения и технологические параметры, при которых отливки можно отнести к классу «тонкостенных протяженных». Для такого класса отливок характерно заполнение полости пресс-формы сплошным фронтом расплава, с интенсивным теплообменом между расплавом и стенками пресс-формы.

6. Разработана методика выбора места подвода расплава к отливке. Методика основана на использовании уравнения регрессии, полученного на основе вычислительного полного трехфакторного эксперимента, которое позволяет оценить, будет ли заполнена отливка, при выбранном месте его подвода к отливке, в зависимости от геометрических соотношений отливки и выбранных значений параметров технологического процесса литья под давлением.

7. На основе разработанной новой методики расчета значений элементов литниковой системы и на основе разработанной методики выбора места подвода расплава к отливке была спроектирована литниковая система для отливки «Радиатор». Результаты практических испытаний изготовленной пресс-формы для отливки «Радиатор» показали адекватность расчетных данных практике. Опытная партия отливок «Радиатор» получена без поверхностных дефектов типа неспай и неслитина. Изготовленная пресс-форма принята в производство.

8. Разработана программа для автоматизированного расчета потерь перегрева в различных литниковых системах. Алгоритм расчета основан на модели малой интенсивности охлаждения и помимо теплового взаимодействия отливки и пресс-формы учитывает дополнительный нагрев расплава и пресс-формы за счет сил трения. Программа позволяет получить более точный результат по сравнению с классическим тепловым расчетом и позволяет технологу сократить время на вычисление потерь перегрева, а также создать базу типовых литниковых систем с известными параметрами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 15595-84 Машины литья под давлением – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984 – 27 с.
2. ГОСТ 17588-81 Оборудование литейное. Машины для литья под давлением. Размеры присоединительные для крепления пресс-форм – Москва: Издательство стандартов, 1981 – 6 с.
3. Литье под давлением. Под ред. А.К. Белопухова. М.: Машиностроение, 1975 - 400 с.
4. Беккер М.Б. Литье под давлением. - 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1990 - 400 с.
5. Технология литейного производства: Специальные виды литья. Учебник для вузов по специальностям «Машины и технология литейного производства», «Литейное производство черных и цветных металлов»/ Ю.А. Степанов, Г.Ф. Баландин, В.А. Рыбкин; Под ред. Ю.А. Степанова – М.: Машиностроение, 1983 – 287 с.
6. Optimization of Process Parameters during Pressure Die Casting of A380: a Silicon-Based Aluminium Alloy Using GA & Fuzzy Methodology Arun Kumar Gupta¹ & Satish Kumar & Pankaj Chandna & Gian Bhushan. Received: 21 April 2020 /Accepted: 8 July 2020
7. Geoffrey K. Sigworth & Raymond J. Donahue The Metallurgy of Aluminum Alloys for Structural High-Pressure Die Castings. Published: 08 November 2020 Volume 15, pages 1031–1046, (2021)
8. Туркин В.Д., Румянцев М.В. Структура и свойства цветных металлов. М.: Металлургиздат. 1947. 439 с.
9. Корольков А.М. Литейные свойства металлов и сплавов. М.: Изд-во Академии наук СССР. 1960. 196 с.

10. Lukas Dwi Purnomo Analysis design of the gating system on highpressure die casting process for production effectiveness. To cite this article: et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 508 012058
11. The Influence of the Gate Geometry on Selected Process Parameters in the High Pressure Die Casting Technology / Jan Majernik, Stefan Gaspar, Martin Podaril, Jan Kolinsky. March 2019 MANUFACTURING TECHNOLOGY 19(1):101-106
12. Липницкий А.М., Морозов И.В. Технология цветного литья. – Л. Машгиз, 1986 – 224 с.
13. Белоусов Н. Н. Плавка и разливка сплавов цветных металлов / Н. Н. Белоусов. - 3-е изд., перераб. и доп. - Ленинград : Машиностроение : Ленингр. отделение, 1981. - 80 с.
14. Campbell J. *The New Metallurgy of Cast Metals: Casting, 2nd Edition*. Butterworth-Heinemann, 2003. 337 p.
15. Маційчук В.В., Корнюк А.Н. Возможности повышения эффективности технологии литья под давлением. Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2006. № 33. С. 26-28.
16. Radhika Chavan, P S Kulkarni Die design and optimization of cooling channel position for cold chamber high pressure die casting machine / May 2020 IOP Conference Series Materials Science and Engineering 810:012017
17. Influence of High-Pressure Die Casting Parameters on the Cooling Rate and the Structure of EN-AC 46000 Alloy / Wojciech Kowalczyk, Rafał Dańko , Marcin Górny, Magdalena Kawalec and Andriy Burbelko. August 2022 Materials 15(16):5702
18. Михальцов А.М., Пивоварчик А.А. Вентиляция пресс-форм при литье под давлением. Литье и металлургия. 2019. № 1. С. 34-37.
19. Рыжиков А.А. Влияние газового режима форм на качество отливок под давлением / А.А. Рыжиков, С.З. Злотин, Литейное производство. 1970. №10. С.14-15
20. Юдин С.А. Особенности получения изделий методом литья под давлением в условиях цифрового производства. В сборнике: альманах научных

работ молодых ученых Университета ИТМО. XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. 2018. С. 268-270.

21. Анализ технологии получения отливок способом литья под высоким давлением. Назаров С.Л., Лекарев А.В., Ковалева А.А., Гильманшина Т.Р. В сборнике: Решетневские чтения. Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2021. С. 241-244.

22. Genick Bar–Meir, Ph. D. Fundamentals of Die Casting Design 7449 North Washtenaw Ave Chicago, IL 60645

23. Труды XII Съезда литейщиков России, 7-11 сентября 2015 г. / Российская ассоц. Литейщиков, Правительство Нижегородской обл. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. Технический ун-т, 2015. – 519 с.

24. Труды XIII Съезда литейщиков России, 18-22 сентября 2017 г. / Российская ассоциация литейщиков, Правительство Нижегородской области. – Челябинск: Изд. Центр ЮурГУ, 2017. – 437 с.

25. Вагин Г.Я. Ресурсо- и энергосбережение в литейном производстве: учебник для вузов / Г.Я. Вагин, В.А. Коровин, И.О. Леушин, А.Б. Лоскутов. –М.: ФОРУМ, 2012. - 271с.

26. Дибров И.А. Вклад общественных организаций литейщиков в развитие литейного производства России и СССР 1866-2015 годы // Литейщик России.–2015.–№8.

27. Дибров И.А. Литейное производство - прогресс машиностроения// Литейщик России. –2019. –№ 8. –С. 13–24.

28. Дибров И.А. Рекомендации XIII съезда литейщиков по развитию литейного производства и литейного машиностроения России// Литейщик России. –2018. –№ 5. –С. 11–16.

29. Дибров И.А. Качественное литье - прогресс машиностроения// Литейщик России. –2017. –№ 8. –С. 18–27.

30. Альтман М.Б., Лебедев А.А., Чухров М.В. Плавка и литье легких сплавов. –М. : Metallurgia, 1969. –680 с.
31. Зарубин А.М. Об обеспечении прочности и герметичности отливок при литье под давлением. Литейщик России. 2007. № 2. С. 30-32.
32. Савина А.И., Леушин И.О. Физико-химическое взаимодействие материала отливок с металлом вкладыша пресс-форм для литья под давлением цветных металлов / В сборнике: Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. сборник научных трудов XII-ой Международной научно-практической конференции в 4-х томах. Ответственный редактор: Горохов А.А., 2015. С. 18-21.
33. Анализ влияния теплового баланса на показатель эксплуатационной стойкости пресс-форм для литья под давлением / Гавариев Р.В., Леушин И.О., Савин И.А. Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 1. С. 7-9.
34. Гнатуш В.А., Дорошенко В.С. Состояние и перспективы развития мирового рынка металлоотливок. Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка.– 2018.– №3. –С. 66–70.
35. Буданов Е.Н. Импортзамещение отливок. Литейщик России.–2018.– №3.–С. 5–12.
36. Альтман М.Б. Андреев А.Д., Балахонцев Г.А. и др. Плавка и литье алюминиевых сплавов: Справ. изд./ Под ред. В.И. Добаткина. – М. : Metallurgia, 1983. –351 с.
37. Познышев С.Л. Анализ проекта освоения серийного производства габаритных герметичных алюминиевых отливок / С.Л. Познышев, Н.М. Джафаров, С.В. Богушевич, Н.А. Белов и др. // Литейщик России. –2014. –№ 10. – С. 12–17.
38. Коротченко А.Ю., Куцый О.Я. Автоматизация проектирования пресс – форм литья под давлением // Литейщик России. – 2007. - №1. – С.16-18.
39. Савин И.А., Гавариев Р.В. Особенности проектирования технологической оснастки для получения отливок сплавов цветных металлов. Вестник

- Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2012. № 4-2. С. 41-43.
40. Бархударов М.Р., Вольнов И.Н. Минимизация захвата воздуха в камере прессования при литье под давлением. Литейщик России. 2013. № 3. С. 30-34.
41. Пивоварчик А.А., Михальцов А.М. Смываемость разделительных покрытий при изготовлении отливок из алюминиевых сплавов методом литья под давлением Литье и металлургия. 2018. № 1 (90). С. 78-83.
42. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа. 2003. С. 840
43. Каширцев Л.П. Литейные машины. Литье в металлические формы.: Учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2005 - 368 с.
44. Белопухов А.К. Технологические режимы литья под давлением. - 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1985 - 272 с.
45. Модернизация поршневой пары машины литья под давлением с холодной горизонтальной камерой прессования / Леушин И.О., Кошелев О.С., Моисеев Д.О., Маслов К.А. Литейщик России. 2015. № 4. С. 24-25.
46. Пути совершенствования технологии литья под давлением тяжелых крупногабаритных деталей из алюминиевых сплавов на примере блоков цилиндров / Падерин В.Н., Абдулгазис У.А. Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. 2014. № 43. С. 25-32.
47. Рабинович Б.В. Введение в литейную гидравлику. М.: Машиностроение, 1966. – 423 с.
48. Чистяков В.В. Методы подобия и размерностей в литейной гидравлике. М.: Машиностроение, 1990 - 224 с.
49. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М. : Машиностроение, 1975. – 559с.
50. Чистяков В.В., Малов А.Г., Честных В.А., Шатульский А.А. Теория заполнения форм расплавом. М.: Машиностроение, 1995. – 192

51. Исследование местных сопротивлений литниковой системы / Васенин В.И., Васенин Д.В., Богомягков А.В., Шаров К.В. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2012. Т. 14. № 2. С. 46-53.
52. Исследование интерференции местных сопротивлений литниковой системы / Васенин В.И., Богомягков А.В., Шаров К.В. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2013. Т. 15. № 1. С. 82-87.
53. Образование задиров на поверхности отливок при литье алюминиевых сплавов под давлением. Пивоварчик А.А., Михальцов А.М., Дашкевич В.Г. Литейщик России. 2013. № 2. С. 40-42.
54. Чистяков В.В., Воздвиженский В.М. Расчет критической скорости заполнения формы / Литейное производство.–1971.–№3.–С. 9–11.
55. Мусияченко А. С. Предельно допустимые скорости течения расплава в форме// Литейное производство.– 1987.– №2. –С. 16–17.
56. Вейник А.И. Теория особых видов литья. М.: МАШГИЗ, 1953. – 300 с.
Беккер М.Б. Литье под давлением. - 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1990 - 400 с.
57. Гини Э.Ч. Технология литейного производства: специальные виды литья. Учебник для студ. высш. учеб. заведений. / Э.Ч. Гини, А.М. Зарубин, В.А. Рыбкин - М.: Издательский центр «Академия», 2005 - 352 с.
58. Горюнов И.И. Пресс-формы для литья под давлением. Справочное пособие. Л.: Машиностроение, 1973 - 256 с.
59. Титов Н.Д., Степанов Ю.А. Технология литейного производства. М.: Машиностроение, 1974 - 472 с.
60. Шатульский А.А. Моделирование процесса заполнения формы расплавом / А.А. Шатульский, В.А. Изотов, А.А. Акутин, А.С. Равочкин, Ю.В. Чибирнова // Заготовительные производства в машиностроении. – 2007. – №8. – С. 11–17.

61. Шатульский А.А. Разработка методов расчета процессов заполнения полости форм расплавом / А.А. Шатульский, В.А. Изотов, Т.А. Курочкина // Заготовительные производства в машиностроении. – 2003. – №6. – С. 7–10.
62. Вейник А.И. Теория затвердевания отливки: Машгиз, 1960 – 435 с.
63. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности: Госэнергоиздат, 1959 - 184 с.
64. Павловский Н.Н. Краткий гидравлический справочник. Строй-издат, - 1940.
65. Баландин Г.Ф. Теория формирования отливки: Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки: Учебник для вузов - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998 - 360 с.
66. Баландин Г. Ф. Формирование кристаллического строения отливки. М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
67. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. В 2-х частях. Ч.І. М. : Машиностроение, 1976 – 328 с.
68. Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. В 2-х частях. Ч.ІІ. М.: Машиностроение, 1979 – 335 с.
69. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Том 1. М.: Наука, 1970 г., - 492 с.
70. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987 г., -840с.
71. Васенин В.И. Экспериментальное определение коэффициентов местных сопротивлений литниковой системы // Литейное производство.– 2009.– №1. –С. 22–25
72. Рабинович Б. В. Введение в литейную гидравлику / Б. В. Рабинович.–М. : Машиностроение, 1966. – 422 с.
73. Гуляев Б.Б. Теория литейных процессов. Л.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
74. Чуркин Б.С. Теория литейных процессов: Учеб. – Екатеринбург, 2006 – 454 с.

75. Колобнев И.Ф. Справочник литейщика. Цветное литье из легких сплавов / И.Ф. Колобнев, В.В. Крымов, А.В. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1974. – 415 с.
76. Галдин Н.М. Литниковые системы для отливок из легких сплавов / Н.М. Галдин. – М. : Машиностроение, 1978. - 195с.
77. Специальные способы литья: Справочник/В.А. Ефимов, Г.А. Анисович, В.Н. Бабич и др.; под общ. ред. В. А. Ефимова. –М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.: ил.
78. Цветное литье. Справочник /Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.; под общ. ред. Н.М. Галдина. – М.: Машиностроение, 1989. – 528 с.
79. Леушин И.О., Романов А.С. О возможностях повышения эффективности работы литниковых систем // Литейщик России. 2010. № 11. С. 45-47.
80. Моисеев В.С., Неуструев А.А. Методология автоматизированного проектирования литниково-питающих систем// Литейное производство.– 1992.– №12. –С. 5–9.
81. Леушин И.О. Разработка и освоение методик автоматизированного проектирования технологии и оснастки для литья под давлением. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Нижний Новгород, 1992
82. Моделирование заполнения расплавом пресс-форм литья под давлением / Коротченко А.Ю., Зарубин А.М., Коротченко И.А. Литейщик России. 2007. № 12. С. 15-19.
83. Моделирование течения расплава в камере прессования при литье под давлением / Коротченко А.Ю., Коротченко И.А., Зарубин А.М. Литейщик России. 2008. № 12. С. 19-21.
84. Моделирование заполнения расплавом пресс-форм литья под давлением / Коротченко А.Ю., Зарубин А.М., Коротченко И.А. Литейщик России. 2007. № 12. С. 15-19.

85. Расчёт литниковых систем для отливок сложной конфигурации при литье под давлением / Коротченко И.А., Смыков А.Ф., Коротченко А.Ю. Заготовительные производства в машиностроении, 2024, Т.22, №1, с. 3-6.
86. An improved model for predicting heat transfer coefficient peak value at the casting-die interfaces / Rong Xua,b, Luoxing Lia,b, Liqiang Zhanga,c, Biwu Zhua,b & Xiaobing Bu. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences. Vol. 21, December 2014, pp. 628-634
87. Оленева Ю.Н. Моделирование процесса литья с программой Flow-3D В сборнике: Уральская школа молодых металлургов. Сборник материалов и докладов XIX Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов — молодых ученых. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Ключевой центр превосходства «Материаловедение перспективных металлосодержащих материалов и технологий их обработки», САЕ Инженерная школа новой индустрии. 2018. С. 420-425.
88. Brian G. Thomas Issues in Thermal-Mechanical Modeling of Casting Processes University of illinois at Urbana-Champaign, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Urbana, IL 61 801. U.S.A.
89. Автоматизация проектирования центробежного литья титановых сплавов / Моисеев В.С., Бобрышев Б.Л., Смыков А.Ф., Бережной Д.В., Конторович И.В. Литейщик России.- 2021. - №12, С. 10 -14.
90. Автоматизированное проектирование системы питания крупногабаритных корпусных отливок из легких сплавов / Моисеев К.В., Смыков А.Ф., Бережной Д.В. Технология легких сплавов. М.: ОАО ВИЛС. 2011, №1,- С.69-72.
91. Смыков А.Ф., Петров Д.Н., Бережной Д.В., Метод для автоматизированного проектирования технологического процесса литья слитков из жаропрочных сплавов в изложницах // Металлургия машиностроения. 2009, №2, - С. 43-47.

92. Шляков А.И. Применение нейросетевых технологий для автоматизации процесса литья с кристаллизацией под давлением. Приоритетные научные направления: от теории к практике. 2016. № 34-1. С. 210-217.
93. Вольнов И.Н. Моделирование литейных процессов - современные вычислительные технологии Литейщик России. 2007. № 11. С. 27-30.
94. Вольнов И.Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов - состояние, проблемы, перспективы Литейщик России. 2007. № 6. С. 14-17.
95. G. Bar – Meir Fundamentals of Die Casting Design, Minneapolis, 2000 – 163 p.
96. Lukas Dwi Purnomo, Dwi Rahmalina, A.Suwandi Analysis design of the gating system on high-pressure die casting process for production effectiveness, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 508, 2019, pp. 1-7
97. Анисович Г.А. Затвердевание отливок: Минск, 1979 - 232 с.
98. Пути решения проблемы устранения дефектов алюминиевых отливок в технологии литья под давлением / Семенова Ю.С., Иванкова Е.Е. Проблемы и перспективы студенческой науки. 2018. № 1 (3). С. 43-44.
99. Павлюк К.И., Тараненко Н.А. Виртуальное моделирование литейной технологии / В сборнике: Металлургия XXI столетия глазами молодых. Материалы VII Международной научно-практической конференции молодых ученых и студентов. Донецк, 2021. С. 84-87.
100. Методика использования компьютерного моделирования литейной технологии / Иоффе М.А., Бройтман О.А., Дембовский В.В., Желателева Р.В. Новые технологии и формы обучения. 2010. № 17. С. 70-72.
101. Монастырский А.В. Развитие отечественной системы компьютерного моделирования литейных процессов «Полигонсофт» / В сборнике: Прогрессивные литейные технологии. Труды X Международной научно-технической конференции. Москва, 2020. С. 433-438.
102. Gating system optimization of high pressure die casting thin-wall AlSi10MnMg longitudinal loadbearing beam based on numerical simulation Xu

Zhao, *Ping Wang, Tao Li, Bo-yu Zhang, Peng Wang, Guan-zhou Wang, and Shi-qi Lu Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110000, China.

103. Моделирование процессов литья под давлением алюминиевых сплавов / Марукович Е.И., Захаров И.Л., Брановицкий А.М., Довнар Д.В. *Литье и металлургия*. 2006. № 2-1 (38). С. 124-127.

104. Simulation of die filling in gravity die casting using SPH and MAGMAsoft / Ha J., Cleary P. W., Alguine V., Nguyen T. *Proc. 2nd Int. Conf. on CFD in Minerals & Process Industries*, Melbourne, Australia. 1999. P. 423-428.

105. Li Y.B., Zhou W. Numerical Simulation of Filling Process in Die Casting / *Materials Technology*. 2003. Vol. 18. N. 1. P 36-41.

106. Xue X. Modelling and simulation of fluid flow and heat transfer in mold filling / PhD thesis, Technical University of Denmark, 1991.

107. Gingold R.A., Monaghan J.J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to nonspherical stars / *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 1970. Vol. 181. P. 375-387.

108. Three-dimensional modelling and simulation of die-casting processes for AlSi alloys / Hwang H.Y., Choi J.K., Marukovich E.I. at al. 67th International World Foundry Congress WFC, Harrogate, UK. 5 -7 July, 2006.

109. Flow Behavior of Semi-Solid Materials / Kumar P., Martin C.L., Brown S.B. *Proc. of the 2nd Intl. Conference on the Processing of Semi-Solid Alloys and Composites*. TMS. 1992. P. 250-262.

110. Аналоговое моделирование процессов литья под давлением / Марукович Е.И., Брановицкий А.М., Захаров И.Д., Чой Ки-Йонг. *Литье и металлургия*. 2005. №2(34). Ч. 1.С. 45-47.

111. Threedimensional image reconstruction for water modelling of metal casting processes / Choi J.K., Choi K.Y., Hwang H.Y. et al. In *Proc. International Conference On Modelling And Simulation MS'2004*, 27—29 April 2004, Minsk, Belarus. P. 216-219.

112. The technique of calibration multi-camera imaging system for fast water flow registration and reconstruction / Choi J.K., Hwang H.Y., Choi K.Y. et al. Proc. of the Eighth International Conference PRIF2005, Minsk, 18-20 May, 2005. P. 177-180.
113. Оценка потерь перегрева расплава при литье под давлением / Коротченко И.А., Смыков А.Ф., Коротченко А.Ю. Заготовительные производства в машиностроении. 2024. Т. 22. № 4. С. 147-151.
114. Сравнение методик расчета литниковых систем при литье под давлением / Коротченко И.А., Смыков А.Ф., Коротченко А.Ю. Литейное производство. 2024. № 4. С. 5-10.
115. ГОСТ 19933-74 Пресс-формы для литья под давлением деталей из цветных сплавов – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974 – 27 с.
116. ГОСТ 19936-74 Постаменты пресс-форм литья под давлением. Конструкция и размеры – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974 – 18 с.
117. ГОСТ 19937-74 Втулки литниковые пресс-форм литья под давлением – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974 – 15 с.
118. ГОСТ 19939-74 Выталкиватели цилиндрические пресс-форм литья под давлением – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974 – 5 с.
119. ГОСТ 19942-74 Колонки возврата пресс-форм литья под давлением. Конструкция и размеры – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974 – 4 с.
120. ГОСТ 19945-74 Упоры для плит пресс-форм литья под давлением. Конструкция и размеры – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974 – 3 с.
121. ГОСТ 19946-74 Пресс-формы для литья под давлением деталей из цветных сплавов. Технические требования – Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974 – 4 с.

122. COMPUTER-AIDED DESIGN OF DIE CASTING DIES // Leushin I.O., Timofeev G.I., Nishchenkov A.V., Tabanov L.A., Smirnov V.M., Nazarychev S.I., Uvarov N.A., Ovchinnikov G.N., Yakovlev D.V., Karaulov I.N. Литейное производство. 1994. № 4. С. 31-33.
123. Lee P.D. Multiscale modelling of solidification microstructures, including microsegregation and microporosity, in an Al-Si-Cu alloy // Materials Science and Engineering. 2004. A365. P. 57-65.
124. Zhu J.D., Cockcroft S.L., Maijer D.M. Modeling of microporosity formation in A356 aluminum alloy casting // Metallurgical and Materials. Transactions A. Volume 37A. March 2006. P. 1075-1085.
125. Bahmani A. A mathematical model for prediction of microporosity in aluminum alloy A356 // Int J Adv Manuf Technol. 2013. 64. P. 1313–1321.

Акты о внедрении работы



ООО Инструментальный завод
«БЛ ГРУПП»

Тверская обл., г. Лихославль, ул. Первомайская, д. 51

АКТ
ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Коротченко Игоря Андреевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.3. Литейное производство, были использованы в деятельности ООО «Инструментальный завод «БЛ ГРУПП».

К числу использованных результатов относятся:

применение полученных в данной работе уравнений регрессии, для расчета потерь перегрева в каналах литниковой системы для отливок, изготавливаемых литьем под давлением, позволило снизить температуру заливки за счет оптимизации конфигурации и длины литниковых каналов.

Применение указанных результатов позволяет снизить температурное воздействие со стороны расплава на пресс-форму и повысить срок ее эксплуатации.

Настоящий акт не является основанием для взаимных финансовых расчетов.

Директор

А.А. Юриков



JSC «Electrosetstroyproject»
 Russia, 127566, Moscow
 1, building 36, Vysokovoltny proezd
 phone: +7 (495) 234 71 20
 fax: +7 (495) 727 43 71
 info@essp.ru, www.essp.ru



АО «Электросетьстройпроект»
 Россия, 127566, г. Москва,
 Высоковольтный проезд, дом 1, стр. 36
 телефон: +7 (495) 234 71 20
 факс: +7 (495) 727 43 71
 info@essp.ru, www.essp.ru

Исх. № 800Т-24 от 08.04.2024 г.

Утверждаю

Генеральный директор

АО «Электросетьстройпроект»

 А.В. Тищенко

АКТ

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Коротченко Игоря Андреевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.3. Литейное производство, были использованы в деятельности АО «Электросетьстройпроект».

К числу использованных результатов относятся:

применение разработанной методики расчёта литниковой системы для тонкостенных протяжённых отливок, получаемых литьём под давлением, позволило определить оптимальные параметры литниковых систем, которые позволили снизить температуру заливки расплава и уменьшить скорость впуска расплава в полость пресс-формы.

Использование указанных результатов позволяет сократить сроки отработки технологического процесса изготовления отливок и повысить число съёмов годных отливок с одной пресс-формы.

Настоящий акт не является основанием для взаимных финансовых расчетов.

Технический директор
 АО «Электросетьстройпроект»



Д.А. Винников

Утверждаю

Декан факультета

«Машинностроительные технологии»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

А.С. Комшин

2024 г.



АКТ

Настоящий акт составлен в том, что результаты диссертационной работы Коротченко Игоря Андреевича, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.3 Литейное производство, используются на кафедре МТ5 «Литейные технологии» в лекционных курсах «Проектирование литейной оснастки» и «Оборудование литейных цехов», а также в курсовом и дипломном проектировании в виде пакетов прикладных программ САПР.

Заведующий кафедрой

МТ5 «Литейные технологии»

А.Ю. Коротченко

**Код программы для автоматизированного определения потерь перегрева
расплава в элементах литниковой системы**

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, Grids, ExtCtrls, Math;
type
  TForm1 = class(TForm)
    ListBox1: TListBox;
    Button1: TButton;
    Label1: TLabel;
    Button2: TButton;
    ListBox2: TListBox;
    Label2: TLabel;
    Label3: TLabel;
    Edit1: TEdit;
    StringGrid1: TStringGrid;
    Label4: TLabel;
    StringGrid2: TStringGrid;
    Label5: TLabel;
    Panel1: TPanel;
    StringGrid3: TStringGrid;
    Label6: TLabel;
    Button3: TButton;
    Panel2: TPanel;
    Label7: TLabel;
    Button4: TButton;
    StringGrid4: TStringGrid;
    Label8: TLabel;
    Edit2: TEdit;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Edit3: TEdit;
    Edit4: TEdit;
    Label11: TLabel;
    Edit5: TEdit;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Edit6: TEdit;
```

```

Label14: TLabel;
Edit7: TEdit;
Label15: TLabel;
Edit8: TEdit;
Label16: TLabel;
Edit9: TEdit;
procedure FormCreate(Sender: TObject);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;
//Procedure METAL(alloy:byte;var TL,TS,TK,DTK,rt,rg,ct,cg,lmt,lmg:real);
var
  Form1: TForm1;
  i,N:byte;
  UKret1,UKret2,UKret3,DTSYM:real;
  TL,TS,TK,DTK,rt,rg,ct,cg,lmt,lmg,at,ag,bt,bg,KinVz:real;
  TFN,cf,lf,rf,af,bf,Ka,KBf, KBf1,Xf:real;
  UPIT,APIT,BPIT,LPIT,ULETKAN,RNLK,LNLK,RNSTK,LNSTK:real;
  SKSIPOV,SKSISECH,SKSIPSECH,SKSIPKSECH,SKSOPRTR,SSYMSOPR,S
YMSOPRLS:real;
  SOPRPIT,SOPRLETK,SOPRSIST,SYMDTTrenK,SYMDTTrenLS,DTTRPIT,D
TTRLETK,DTTRSTK:real;
  SYMDT,SSYMDT:real;
  SYMLK,SYMLK1,SYMLKkv,SYMLKkv1:real;
  LK:array[1..20] of real; AK:array[1..20] of real;BK:array[1..20] of real;
  LK1:array[1..20] of real;
  RK:array[1..20] of real;PPK:array[1..20] of real; SK:array[1..20] of real;
  VK:array[1..20] of real;
  RO:array[1..20] of real;U:array[1..20] of real;Re:array[1..20] of real;
  U1:array[1..20] of real;
  ReSt:array[1..20] of real;lRe:array[1..20] of real;
  KSIPOV:array[1..20] of real;
  m:array[1..20] of real;m1:array[1..20] of real;m2:array[1..20] of real;
  m3:array[1..20] of real;m4:array[1..20] of real;
  KSISECH:array[1..20] of real;
  k:array[1..20] of real;k1:array[1..20] of real;k2:array[1..20] of real;
  k3:array[1..20] of real;k4:array[1..20] of real;
  KSIPSECH:array[1..20] of real;

```

```

s:array[1..20] of real;s1:array[1..20] of real;s2:array[1..20] of real;
s3:array[1..20] of real;s4:array[1..20] of real;
KSOPRTR:array[1..20] of real; SYMSOPR:array[1..20] of real;
KSIPKSECH:array[1..20] of real;
r:array[1..20] of real;
DTTren:array[1..20] of real;DTMet:array[1..20] of real;
DTForm:array[1..20] of real;TFNov:array[1..20] of real;
DTTyr:array[1..20] of real;DTDisp:array[1..20] of real;
DT:array[1..20] of real;
implementation
{$R *.dfm}
Procedure METAL(alloy: byte; var TL, TS, TK, DTK, rt, rg, ct, cg, lmt, lmg,
KinVz:real);
begin
  case alloy of
    1:begin {AK12 (AJI2)}
      TL:=864; TS:=850; TK:=857; DTK:=14; rt:=2500; rg:=2200; ct:=1014;
cg:=1194;
      lmt:=104; lmg:=83; KinVz:=0.3e-6;
      end;
    2:begin {AK12M2}
      TL:=867; TS:=840; TK:=854; DTK:=27; rt:=2500; rg:=2200; ct:=1077;
cg:=1274;
      lmt:=104; lmg:=83;KinVz:=0.3e-6;
      end;
    3:begin {AK7ч (AJI9)}
      TL:=889; TS:=843; TK:=866; DTK:=46; rt:=2500; rg:=2200; ct:=1085;
cg:=1282;
      lmt:=104; lmg:=83;KinVz:=0.3e-6;
      end;
  end;
end;
Procedure Pressforma(material:byte;var rf,cf,lf:real);
begin
  case material of
    1:begin {Углеродистая сталь}
      rf:=7800; cf:=753; lf:=50;
      end;
    2:begin {4X5MΦC}
      rf:=8200; cf:=660; lf:=46;
      end;
    3:begin {3X2B8Φ}
      rf:=8400; cf:=760; lf:=43;
      end;
  end;
end;

```

```

end;
end;
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
Var ss1:String;
    alloy,material:byte;
    TL,TS,TK,DTK,rt,rg,ct,cg,lmt,lmg:real;
    rf,cf,lf:real;
begin
    alloy:=Form1.ListBox1.ItemIndex +1;
    material:=Form1.ListBox2.ItemIndex +1;
    If alloy=0 then
        begin
            MessageDlg('Ошибка',mtError, [mbOK], 0) ;
            exit;
        end
    else
        begin
            METAL(alloy, TL,TS,TK,DTK,rt,rg,ct,cg,lmt,lmg,KinVz);
        end;
    If material=0 then
        begin
            MessageDlg('Ошибка',mtError, mbOKCancel, 0);
            exit;
        end
    else
        begin
            Pressforma(material,rf,cf,lf);
            N:=StrToInt(Edit1.Text);
            BPIT:=StrToFloat(Edit2.Text); BPIT:= BPIT/1000;
            APIT:=StrToFloat(Edit3.Text);APIT:= APIT/1000;
            SPIT:=APIT*BPIT;
            LPIT:=StrToFloat(Edit9.Text);LPIT:= LPIT/1000;
            VPIT:=LPIT+SPIT;
            UPIT:=StrToFloat(Edit4.Text);
            RNSTK:=StrToFloat(Edit5.Text); RNSTK:=RNSTK/1000;
            SNSTK:=3.14*SQR(RNSTK);
            LNSTK:=StrToFloat(Edit8.Text); LNSTK:=LNSTK/1000;
            VNSTK:=LNSTK*SNSTK;
            RNLK:=StrToFloat(Edit6.Text); RNLK:=RNLK/1000;
            SLETKAN:=3.14*SQR(RNLK);
            LNLK:=StrToFloat(Edit7.Text); LNLK:=LNLK/1000;
            VLETKAN:=LNLK*SLETKAN;
            ag:=lmg/(cg*rg); af:=lf/(cf*rf);
            Ka:=af/ag;
        end;
    end;
end;

```

```

    bf:=SQRT(1f*cf*rf); // ShowMessage(' Ka='+FloatToStr(Ka));
    KBf:=2000;
UKret1:= 5;
UKret2:= 20;
UKret3:= 30;
DTSYM:=0;
SKSIPOV:=0;SKSISECH:=0;SKSIPSECH:=0;SKSIPKSECH:=0;
i:=0;
repeat
    i:= i+1;
    m[i]:=0;
    k[i]:=0;
    s[i]:=0;
    r[i]:=0;
    KSISECH[i]:=0;
    KSIPSECH[i]:=0;
    KSIPKSECH[i]:=0;
until (i=N); // ShowMessage('i='+IntToStr(i));
    for i:=1 to N do
    begin
        m[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[1,i]);
        k[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[2,i]);
        s[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[3,i]);
        r[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid1.Cells[4,i]);
    end;
    for i:=1 to N do
    begin
        LK[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid2.Cells[1,i]); LK[i]:= LK[i]/1000;
        RK[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid2.Cells[2,i]); RK[i]:= RK[i]/1000;
        AK[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid2.Cells[3,i]); AK[i]:= AK[i]/1000;
        BK[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid2.Cells[4,i]); BK[i]:= BK[i]/1000;
    end;
    for i:=1 to N do
    begin
        if RK[i]>0 then
            Begin
                RO[i]:= RK[i];
                SK[i]:=3.14*SQR(RK[i]);
            end
        else
            // if LK[i]/BK[i]>10 then
            if AK[i]/BK[i]>10
                then
                    begin

```

```

        RO[i]:= BK[i]/2;
        SK[i]:= AK[i]*BK[i];
        end
    else
        begin
            PPK[i]:= 2*(AK[i]+BK[i]);
            SK[i]:= AK[i]*BK[i];
            RO[i]:= SK[i]/PPK[i];
            end;
        VK[i]:= LK[i]*SK[i];
    end;
    for i:=1 to N do
    begin
        m1[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid3.Cells[1,i]);
        m2[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid3.Cells[2,i]);
        m3[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid3.Cells[3,i]);
        m4[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid3.Cells[4,i]);
        KSIPOV[i]:= 0.2*m1[i]+0.55*m2[i]+1.04*m3[i]+1.4*m4[i];
        SKSIPOV:= SKSIPOV+KSIPOV[i];
    end;
    ShowMessage('SKSIPOV='+FloatToStr(SKSIPOV));
    for i:=1 to N do
    begin
        k1[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid4.Cells[1,i]);
        k2[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid4.Cells[2,i]);
        k3[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid4.Cells[3,i]);
        k4[i]:= StrToFloat(Form1.StringGrid4.Cells[4,i]);
        KSISECH[i]:= 0.42*k1[i]+0.34*k2[i]+0.25*k3[i]+0.15*k4[i];
        SKSISECH:= SKSISECH+KSISECH[i];
    end;
    ShowMessage('SKSISECH='+FloatToStr(SKSISECH));
    for i:=1 to N-1 do
        Begin
            if s[i]>0 then KSIPSECH[i]:=SQR(SK[i+1]/SK[i]-1);
                SKSIPSECH:= SKSIPSECH+KSIPSECH[i];
            end;
            ShowMessage('SKSIPSECH='+FloatToStr(SKSIPSECH));
    SSYMSOPR:=0; SKSOPRTR:=0;
    for i:=1 to N do
        Begin
            if i=1 then
                begin
                    U[i]:= UPIT*SPIT/SK[i];
                    Re[i]:=U[i]*RO[i]/KinVz;

```

```

    end
  else
    begin
      U[i]:= U[i-1]*SK[i-1]/SK[i];
      Re[i]:=U[i]*RO[i]/KinVz;
      end;
      ReSt[i]:=exp(0.25*ln(Re[i]));
      lRe[i]:=0.11*(68/ReSt[i]);
      KSOPRTR[i]:= lRe[i]*LK[i]/RO[i];
      SKSOPRTR:= SKSOPRTR+KSOPRTR[i];
      SYMSOPR[i]:=(KSIPOV[i]+KSISECH[i]+KSIPSECH[i]+KSIPKSECH[i])*SQ
R(SNSTK/SK[i])+KSOPRTR[i];
      SSYMSOPR:= SSYMSOPR+SYMSOPR[i];
      end;
      SOPRLETK:= 0.5*SQR(SNSTK/SLETKAN);
      SOPRPIT:=1.1*SQR(SNSTK/SPIT)+0.35*SQR(SNSTK/SPIT);
      SYMSOPRLS:=SOPRLETK+SOPRPIT;
      ShowMessage('U(1)='+FloatToStr(U[1]));
      ShowMessage('U(2)='+FloatToStr(U[2]));
      ShowMessage('U(3)='+FloatToStr(U[3]));
      ShowMessage('Re(1)='+FloatToStr(Re[1]));
      ShowMessage('Re(2)='+FloatToStr(Re[2]));
      ShowMessage('Re(3)='+FloatToStr(Re[3]));
      ShowMessage('SSYMSOPR='+FloatToStr(SSYMSOPR));
      SOPRSIST:= SSYMSOPR+SYMSOPRLS;
      ShowMessage('SOPRSIST='+FloatToStr(SOPRSIST));
      SYMDTTrenK:=0;
      for i:=1 to N do
        Begin
          DTTren[i]:=(0.239*4186.8/9.81*SK[i]*rg*SYMSOPR[i]*(SQR(U[i])/(2*9.8))*L
K[i])/(VK[i]*rg*cg);
          SYMDTTrenK:=SYMDTTrenK+DTTren[i];
          DTMet[i]:=DTTren[i]*(1-Ka);
          DTForm[i]:= DTTren[i]-DTMet[i];
          TFNov[i]:=TFN+DTForm[i];
        end;
        ShowMessage('SYMDTTrenK='+FloatToStr(SYMDTTrenK));
        DTTRPIT:=(102*SPIT*rg*SOPRPIT*(SQR(UPIT)/(2*9.8))*LPIT)/(VPIT*rg*c
g);
        ULETKAN:= UPIT*SPIT/SLETKAN;

        DTTRLETK:=(102*SLETKAN*SOPRLETK*(SQR(ULETKAN)/(2*9.8))*LNLK)/(V
LETKAN*rg*cg);
        SYMDTTrenLS:=DTTRPIT+DTTRLETK;

```

```

ShowMessage('SYMDTTrenLS='+FloatToStr(SYMDTTrenLS));
SYMDT:=0;
SYMLK:=LPIT;
for i:=1 to N do
Begin
  SYMLK:= SYMLK+LK[i];
  if i=1 then
    SYMLK1:=LPIT
  else
    SYMLK1:=SYMLK+LK[i-1];
  if U[i]>UKret2 then
    if U[i]< UKret3 then
      begin
        DTTyr[i]:=(1.13*bf*(TL-TFNov[i])*(SQRT(SYMLK)-
SQRT(SYMLK1)))/(cg*rg*Ro[i]*SQRT(U[i]));
        KBf1:=KBf*SQR(bf);
        U1[i]:=SQR(U[i]);
        SYMLKkv:=SQR(SYMLK); SYMLKkv1:=SQR(SYMLK1);
        DTDisp[i]:=(0.75*power(KBf1,0.333)*(TL-
TFNov[i])*(power(SYMLKkv,0.333)-
power(SYMLKkv1,0.333)))/(cg*rg*Ro[i]*power(U1[i],0.333));
        DT[i]:=(DTTyr[i]+DTDisp[i])/2;
      end
    else
      begin
        KBf1:=KBf*SQR(bf);
        U1[i]:=SQR(U[i]);
        SYMLKkv:=SQR(SYMLK); SYMLKkv1:=SQR(SYMLK1);
        DTDisp[i]:=(0.75*power(KBf1,0.333)*(TL-
TFNov[i])*(power(SYMLKkv,0.333)-
power(SYMLKkv1,0.333)))/(cg*rg*Ro[i]*power(U1[i],0.333));
        DT[i]:=DTDisp[i];
      end
    else
      begin
        DTTyr[i]:=(1.13*bf*(TL-TFNov[i])*(SQRT(SYMLK)-
SQRT(SYMLK1)))/(cg*rg*Ro[i]*SQRT(U[i]));
        DT[i]:=DTTyr[i];
      end;
    SYMDT:=SYMDT+DT[i];
  end;
  SSYMDT:=SYMDT;
  ShowMessage('Потр. пер. SSYMDT='+FloatToStr(SSYMDT));
end;

```

```

procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
begin
Close;
end;
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
  Var
  NN,ii:byte;
begin
  Panel1.Show;
Form1.StringGrid3.Colcount:=5 ;
N:=3;
NN:=N+1;
Form1.StringGrid3.Rowcount:= NN ;
Form1.StringGrid3.Cells[0,0]:='№ элемента';
Form1.StringGrid3.Cells[1,0]:='30 град.';
Form1.StringGrid3.Cells[2,0]:='60 град.';
Form1.StringGrid3.Cells[3,0]:='90 град.';
Form1.StringGrid3.Cells[4,0]:='120 град.';
for i:=1 to NN do
  Form1.StringGrid3.Cells[0,i]:= IntToStr(i);
for i:=1 to N do
  Begin
  for ii:=1 to 5 do
  Form1.StringGrid3.Cells[ii,i]:='0';
  end;
end;
end;
procedure TForm1.Button4Click(Sender: TObject);
  Var
  NN,ii:byte;
begin
  Panel2.Show;
Form1.StringGrid4.Colcount:=5 ;
N:=3;
NN:=N+1;
Form1.StringGrid4.Rowcount:= NN ;
Form1.StringGrid4.Cells[0,0]:='№ элемента';
Form1.StringGrid4.Cells[1,0]:='0.2';
Form1.StringGrid4.Cells[2,0]:='0.4.';
Form1.StringGrid4.Cells[3,0]:='0.6';
Form1.StringGrid4.Cells[4,0]:='0.8';
for i:=1 to NN do
  Form1.StringGrid4.Cells[0,i]:= IntToStr(i);
for i:=1 to N do
  Begin

```

```

    for ii:=1 to 5 do
      Form1.StringGrid4.Cells[ii,i]:='0';
    end;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);
  Var
  NN,ii:byte;
begin
  Panel2.Hide;
  Panel1.Hide;
  Form1.ListBox1.AddItem('AK12',Sender);
  Form1.ListBox1.AddItem('AK9ч',Sender);
  Form1.ListBox1.AddItem('AK7ч',Sender);
  Form1.ListBox2.AddItem('Сталь',Sender);
  Form1.ListBox2.AddItem('ЦНК-7П',Sender);
  Form1.ListBox2.AddItem('ЖС6У',Sender);
  Form1.StringGrid1.Colcount:=5 ;
  N:=3;
  NN:=N+1;
  Form1.StringGrid1.Rowcount:=NN ;
  Form1.StringGrid1.Cells[0,0]:='№ элемента';
  Form1.StringGrid1.Cells[1,0]:=' Поворот';
  Form1.StringGrid1.Cells[2,0]:=' Сужение';
  Form1.StringGrid1.Cells[3,0]:='Расширение';
  Form1.StringGrid1.Cells[4,0]:=' Раструб';
  for i:=1 to NN do
    Form1.StringGrid1.Cells[0,i]:= IntToStr(i);
    for i:=1 to N do
      Begin
        for ii:=1 to 5 do
          Form1.StringGrid1.Cells[ii,i]:='0';
        end;
      Form1.StringGrid2.Colcount:=5 ;
      N:=3;
      NN:=N+1;
      Form1.StringGrid2.Rowcount:=NN ;
      Form1.StringGrid2.Cells[0,0]:='№ элемента';
      Form1.StringGrid2.Cells[1,0]:='L-длина, мм';
      Form1.StringGrid2.Cells[2,0]:='R-радиус,мм';
      Form1.StringGrid2.Cells[3,0]:='А-ширина,мм';
      Form1.StringGrid2.Cells[4,0]:='В-толщина,мм';
      for i:=1 to NN do
        Form1.StringGrid2.Cells[0,i]:= IntToStr(i);
        for i:=1 to N do

```

```
Begin
  for ii:=1 to 5 do
    Form1.StringGrid2.Cells[ii,i]:='0';
  end;
end;
end.
```