
ЗАТВЕРДЕВАНИЕ СПЛАВОВ

УДК 518.5; 621.746.62

В. Г. Кострица, О. А. Кострица*

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, Харьков

*Харьковский авиационный институт, Харьков

РАЗВИТИЕ ФОРМУЛ НЕХЕНДЗИ-ГИРШОВИЧА В НАУКЕ О ЛИТЬЕ. Сообщение 3**

Представлена и решена давняя задача математического описания и оптимизации усадочных процессов по критерию наименьшего достаточного расхода металла на прибыль. На этой основе создан, успешно идентифицирован и внедрен в производство метод расчета и проектирования заявленной выше оптимальной прибыли для отливки.

Ключевые слова: математическая модель, усадочные процессы, метод расчета, металл, прибыль.

Представлено і вирішено давнє завдання математичного опису і оптимізації усадкових процесів за критерієм найменшої достатньої витрати металу на прибуток. На цій основі створений, успішно ідентифікований і впроваджений у виробництво метод розрахунку і проектування заявленого вище оптимального прибутку для відливання.

Ключові слова: математична модель, усадкові процеси, метод розрахунку, метал, прибуток.

It is represented and solved lingering task of mathematical exposition and optimization of shrinking processes by the criterion of least sufficient consumption of metal for the head. The method of reckoning and projecting of aforesaid optimum head is created, success identified and engrained in manufacture for casting.

Keywords: mathematical model, shrinking process, reckoning method, head.

*Сообщения 1, 2 см. в журналах "Процессы литья". – 2010. – № 2, 3. – С. 25-35, 16-23

** Разделы 8, 9 (кроме п. 9.1.3, 9.1.4, 9.5.6), 10 (кроме п. 10.4) написаны В. Г. Кострицей; пункты 9.1.3, 9.1.4, 9.5.6, 10.4 – О. А. Кострицей и В. Г. Кострицей в порядке обсуждения

Введение*

В 1957 г. на третьем совещании по проблеме «Усадочные процессы в металлах» при Институте машиноведения и Институте металлургии Академии наук СССР Б. Б. Гуляев в докладе [15] проанализировал ранее (до 1957 г.) предложенные методы расчета прибылей для отливок, разбил их на три группы и предположил возможность решения задачи о расчете оптимальной прибыли для отливки на основе синтеза трех принципов, положенных в основу указанных трех групп методов расчета прибылей. Однако и после 1957 г. продолжались попытки расчета и проектирования оптимальной прибыли для отливки [35-37 и др.]

Сегодня, через 56 лет после доклада Б. Б. Гуляева [15], мы называем и подтверждаем далее необходимую единую научную базу для решения рассматриваемой задачи: предыдущие сообщения 1 [32] и 2 [33].

Рассматриваемая задача была нами сформулирована и решена в 2005-2009 гг. в ходе разработки и освоения прогрессивных технологий изготовления особо сложных гравитационных отливок (литье по выплавляемым моделям) авиационной детали Корпус (рис. 4), отливок других деталей на Государственном предприятии харьковского машиностроительного завода «ФЭД» (ГП ХМЗ «ФЭД»).

6. Задача о формировании плотных гравитационных отливок при наименьшем достаточном расходе металла на прибыль

Плотная отливка – такая, в структуре материала которой отсутствуют усадочные поры и усадочные раковины (по результатам измерения ее плотности или пористости [1, с. 74], рентген-контроля).

Процесс гравитационного литья осуществляется течением металлического расплава в форме под действием его сил тяжести способами литья по выплавляемым моделям, литья в песчано-глинистые формы, литья в металлические и облицованно-металлические формы, литья другими простыми способами.

В 1957 г. Б. Б. Гуляев в докладе [15] выделил актуальную «... задачу создания надежного метода проектирования оптимальных прибылей» [15, с. 10]. К решению этой же задачи через 8 лет обратились Ю. А. Нехендзи и В. Т. Иванов в работе [34], используя вторую формулу Нехендзи-Гиршовича [15, с. 132].

Для решения представленной выше оптимизационной задачи в настоящем сообщении дополнительно описывается создание и практическое использование новой дренажной литниковой системы с целью повышения надежности формирования плотных гравитационных отливок из хромистых сталей.

7. Концепция решения задачи

7.1. Научный подход

*7.1.1. Концепция абсолютно простого***

Прежде всего выбираем научный подход к решению рассматриваемой задачи – согласно науке логики Г. В. Ф. Гегеля: «Уже одно то обстоятельство, что наука должна начинать с абсолютно простого и, стало быть, наиболее всеобщего и пустого, требует, чтобы способ изложения ее допускал только такие совершенно простые выражения для уяснения простого без какого-либо добавления хотя бы одного слова» [17, с. 91].

*В сообщении 3 продолжаются начатые в сообщениях 1, 2: нумерация списка литературы, математических выражений, таблиц, рисунков, условных обозначений

** На месте п. 2.1 в [32] допущена опечатка, которую мы исправляем здесь введением п. 7.1.1.

Затвердевание сплавов

7.1.2. Концепция абстрактного

«... познанию легче постичь абстрактное простое определение мысли, нежели конкретное...» [38, с. 263].

«...повсюду абстрактное должно составлять начало и ту стихию, в которой и из которой развертываются особенности и богатые образы конкретного» [38, с. 264].

7.1.3. Концепция доказанного

«Но какое бы содержание ни имело научное положение, более совершенное или менее совершенное, оно должно быть доказано» [38, с. 273].

7.2. Коррекция решения задачи

7.2.1. Коррекция индексов нижних (цифры)

В [32, п. 3.1.3] в последней верхней строчке перед формулой (25) необходимо координаты (T_{0-j}) и (T_j) сохранить (то есть на (T) не заменять). Эти координаты полезны тем, что, действуя мнемонически, облегчают представление и понимание описываемого физического процесса.

7.2.2. Коррекция знаков

В формуле (25) [32, с. 33] случайно потерялся знак – (минус), что повлекло вводимую ниже коррекцию знаков в формулах (25)-(28), (32), (33). Знаки в формуле (29) сохранились.

7.2.3. Теперь указанные коррекции по п. 7.2.1 и п. 7.2.2 производим ниже, одновременно. В номере такой откорректированной формулы и в формуле (29) справа приставлена буква б – (25) б - (29) б; (32) б, (33) б

$$\rho_{от}(T_j) = \rho_M(T_0) \left[1 - \Pi'_{н.у}(T_{0-j}) \right] \quad (25) б$$

$$\Pi'_{у}(T_{0-j}) - \frac{\rho_M(T_0)}{\rho_M(T_j)} \Pi'_{н.у}(T_{0-j}) + \frac{\rho_M(T_0)}{\rho_M(T_j)} = 1; \quad (26) б$$

$$\Pi'_{у}(T_{0-j}) = 1 - \frac{\rho_M(T_0)}{\rho_M(T_j)} [1 - \Pi'_{н.у}(T_{0-j})]; \quad (27) б$$

$$\Pi'_{н.у}(T_{0-j}) = - \left[\frac{\rho_{от}(T_j)}{\rho_M(T_0)} - 1 \right]; \quad (28) б$$

$$\Pi'_{у}(T_{0-j}) = 1 - \frac{\rho_{от}(T_j)}{\rho_M(T_j)}; \quad (29) б$$

$$\Pi'_{у}(T_{0-3}) = 1 - \frac{\rho_M(T_0)}{\rho_M(T_3)} [1 - \Pi'_{н.у}(T_{0-3})]; \quad (32) б$$

$$\Pi'_{н.у}(T_{0-3}) = - \left[\frac{\rho_{от}(T_3)}{\rho_M(T_0)} - 1 \right]. \quad (33) б$$

7.2.2. Названную в [32, п.3] краевую задачу о формировании усадочной пористости гравитационных отливок далее именуем сокращенно «Первая краевая задача».

8. Анализ действующих технологий изготовления отливок детали Корпус

8.1. Отливка детали Корпус

Здесь мы используем понятие отливка детали Корпус в широком смысле [32, п.2.2] – как отливаемое изделие (рис. 4) вместе с его литниковой системой, представленной в пунктах 9.2 и 9.3.

Масса отливаемого изделия равна $M_{от}(T_3) = 0,900$ кг. Материал отливки – хромистая сталь 14X17H2Л следующего состава, % (мас. доля): 0,05-0,10 С; 0,8-1,5 Si; 0,3-0,8 Mn; 16,0-18,0 Cr; 2,8-3,8 Ni; < 0,025 S; < 0,025 P, остальное – железо.

8.2. Особая сложность отливки детали Корпус

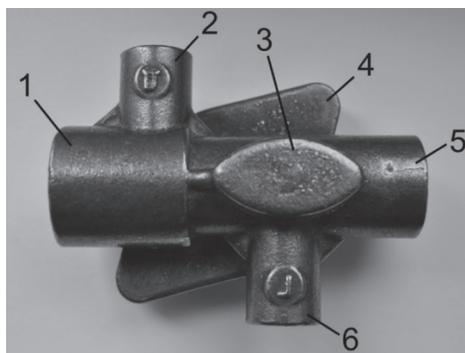
Обусловлена тем, что в исходной конструкции отливки по (рис. 4, а, б) к массивному двухступенчатому цилиндру (рис. 4, поз. 1 – цилиндр больший; поз. 4 – цилиндр меньший) присоединены две бонки: поз. 2 – бонка Д, поз. 5 – бонка Г; два фланца: поз. 3 – фланец верхний (эллипсоидный), поз. 6 – фланец нижний (ромбовидный). Вследствие этого в определенных теплофизических условиях в отливке формируется несколько тепловых узлов, которые по наличию в них усадочной пористости и усадочных раковин можно наблюдать на рис. 4, в и рентгеновских снимках этих отливок.

8.3. Директивный характер действующих технологий изготовления отливок детали Корпус

На ГП ХМЗ «ФЭД» в производстве отливок детали Корпус расплав стали 14X17H2Л готовили согласно инструкции 54ИГ67 (разработана в январе 1967 г.). Отливки изготавливали согласно Карте технологического процесса литья по выплавляемым моделям (разработана в апреле 1982 г.). Конструкции отливки и литниковой системы были предписаны по указанной Карте.

8.4. Качество ранее изготовленных отливок детали Корпус

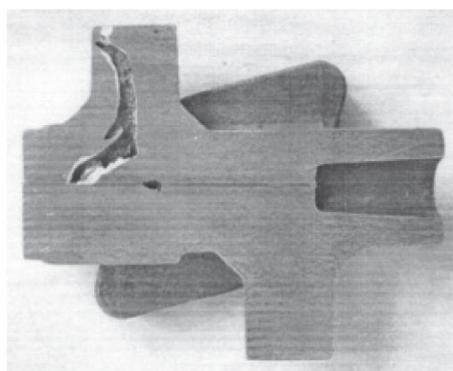
Согласно чертежу и ОСТу 90090-79 (Отливки фасонные из высоколегированной стали со специальными свойствами) в детали Корпус не допускаются пористость, раковины, трещины и другие литейные дефекты.



а



б



в

Рис. 4. Геометрическая модель отливки детали Корпус: а – вид сверху; б – вид снизу (повернуто на 180°), в – вид в продольном разрезе от бонки Д до бонки Г; спецификация: 1 – цилиндр больший, 2 – бонка Д, 3 – фланец верхний (эллипсоидный), 4 – фланец нижний (ромбовидный), 5 – цилиндр меньший, 6 – бонка Г

Фактически все изготовленные в литейном цехе отливки детали Корпус подвергали 1-му рентген-контролю на соответствие указанным выше техническим требованиям, в результате чего в брак отправляли ~ 20 % отливок, остальные ~ 80 % изготовленных отливок подвергали предварительной механической обработке (обдирке) и 2-му рентген-контролю.

Мелкие поры и раковины, выявленные в процессе предварительной механической обработки отливки, разрешается устранить заваркой с подготовительной разделкой дефекта, собственно исправлением его, термообработкой и 3-м окончательным рентген-контролем готовой детали. В итоге из указанных ~ 80 % изготовленных отливок примерно половина отходила в брак.

Таким образом, внутренний и внешний брак в производстве отливок детали Корпус ранее (до сентября 2005 г.) составлял около 60 %. Основные виды этих дефектов – внутренние усадочные поры и усадочные раковины в отливках. Годных отливок получалось ~ 40 % от изготовленных в литейном цехе.

9. Развитие топологической модели элементарной отливки для отливаемого изделия

Названная выше топологическая модель элементарной отливки определяется ее содержанием по п. 3.1.5 в [33] и становится далее предметом исследований, направленных на решение задачи раздела 6.

9.1. Собственно отливка

9.1.1. Здесь «*собственно отливка*» выражает понятие отливки в широком смысле [32, с. 27], но с литниковой системой из наименьшего количества необходимых элементов [33, с. 17] и с проектируемой оптимальной прибылью.

9.1.2. В качестве *отливаемого изделия* используем гравитационную отливку детали Корпус – рис. 4, конструкция которой (отливки) изначально должна отвечать общим требованиям технологичности при литье согласно ГОСТу 14.2001-83 и ДСТУ 1S0 9001-95.

9.1.3. На основе исследований Б. А. Носкова, Н. Н. Смелякова и А. М. Петриченко, опубликованных в 1957 г. [39, 40], мы с позиции концепции абсолютно простого (п. 7.1.1) сформулировали и однозначно далее согласно п. 9.1.4 записали предлагаемое нами простое понятие: под технологичной – при – литье следует понимать такую конструкцию собственно отливки, особенности и свойства которой согласуются и находятся в соответствии с особенностями и свойствами выбранных для ее изготовления металла (сплава), способа и технологии литья.

9.1.4. *Требования синтаксиса русского языка* для выражения понятия «технологичность – при – литье конструкции отливки»

В последние 18 лет по требованиям ДСТУ 1S0 9001-95 для оценки технологичности при литье конструкции конкретной отливки попутно оценивают технологичность этой же отливки по отношению к технологичности при изготовлении ее по другим операциям, сопряженным с литьем, – механической обработки, транспортировки модельного блока на операции нанесения на него обмазки и т. д.

В результате оценка технологичности при литье получается неоднозначной и непонятной, что, в свою очередь, отодвигает сроки создания действительно технологичной – при – литье конструкции литого изделия. Так, на разработку технологичной – при – литье конструкции детали Корпус, согласно пункту 8.3, потребовалось 23 года (1982-2005 гг.).

Рассматриваемая нами задача, однако, решается просто и быстро. Для этого достаточно правильно, как это выполнено в заглавии п.9.1.4, записать выражение «технологичность – при – литье» согласно А. Н. Гвоздеву [41, с. 294 и 297] – через двойные тире. «Двойные тире, поясняет А. Н. Гвоздев [41, с. 297], имеют выделен-

тельное значение: в отличие от скобок и парных запятых они указывают на важность заключенных в них элементов, на их равенство с обрамляющим их предложением».

9.2. Директивная литниковая система для изготовления отливок детали Корпус

Представлена на рис. 4. Ее особенности и эффективность характеризуют данные по пунктам 8.2, 8.3, 8.4, которые в целом указывают на непригодность действующей (до сентября 2005 г.) литниковой системы для дальнейшего производства отливок детали Корпус и, вместе с тем, – на потребность разработки новой литниковой системы.

9.3. Новая литниковая система для формирования плотных отливок детали Корпус

Для формирования плотных отливок детали Корпус В. Г. Кострица предложил, а служба главного металлурга ГП ХМЗ «ФЭД» разработала, освоила и внедрила в производство новую литниковую систему для изготовления отливок детали Корпус, которая от действующей (до сентября 2005 г.) отличается следующими новыми технологическими решениями:

9.3.1. Вместо применяемого вертикального стояка с заливочной чашей и отводной прибылью нами для каждой изготавливаемой отливки по рис. 4 был введен новый горизонтальный коллектор с коротким вертикальным стояком под заливочной чашей.

9.3.2. К восковой модели горизонтального коллектора снизу припаяна фильтровальная сетка из стеклоткани, через которую далее к восковой модели горизонтального коллектора припаяна восковая модель прибыли.

9.3.3. К восковой модели прибыли припаяна восковая модель собственно отливки так, что отливка фланцем нижним (поз. 6 на рис. 4) обращена вверх.

9.3.4. В горизонтальном коллекторе над прибылью по рис. 5 (поз. 5) выполнен технологический элемент шип – полость для создания прямого атмосферного давления воздуха на расплав стали в прибыли.

9.3.5. В конечном итоге в новой литниковой системе каждая отливка из формируемых в одном коллекторе имеет свою автономную оптимальную прибыль, вместе с которой эта автономная прибыль функционирует как одно целое, а все такие автономные системы одинаковые. Поэтому сбои и нестабильность работы новой литниковой системы минимизированы.

9.3.6. Осуществление новых технологических решений по п. 9.3.1, 9.3.3.

При этом расплав стали из заливочной чаши непосредственно попадает в прибыль. Цилиндрическая прибыль своим основанием накрывает тепловые узлы в отливке, которые ранее (до сентября 2005 г.) формировались действующей тогда литниковой системой. В нашей отливке сразу же по мере заполнения формы металлом складывается режим направленного затвердевания и подпитывания. Поэтому образование усадочных дефектов (поры, раковина) в этих условиях оказалось невозможным.

9.4. Оптимизация части новых технологических решений

9.4.1. В 1976 г. И. И. Ярополов, Г. М. Павлова, И. М. Шаратов сообщили [42] об использовании фильтровальных сеток из кремнеземистой стеклоткани КС11ЛА с ячейкой размером 2х2 мм при литье по выплавляемым моделям латуни ЛК80-3Л. Минимальный геометрический напор, при котором расплав латуни входит в отверстия сетки 2х2 мм, равен 27 мм и при быстром заполнении стояка исключает падение шлака в отливки. Эти сетки полностью устранили брак отливок по пленам, шлаковым и песчаным раковинам [42].

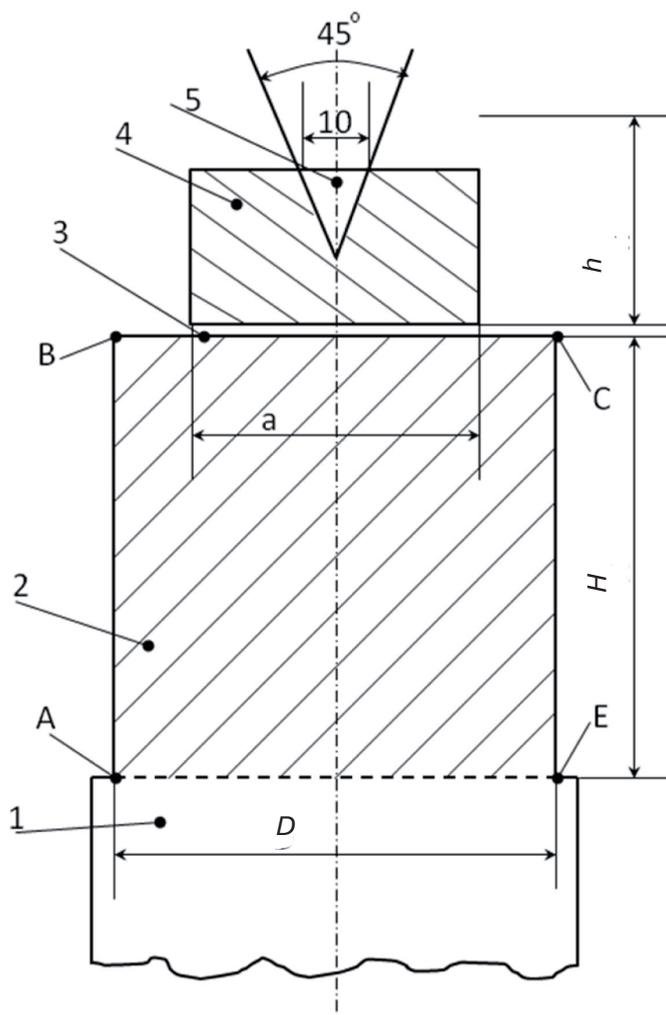


Рис. 5. Геометрическая модель прибыли для гравитационной отливки детали Корпус: 1 – отливка, 2 – прибыль (в поперечном сечении АВСЕ вдоль одного канала коллектора), 3 – фильтровальная сетка из стеклоткани, 4 – горизонтальный коллектор, 5 – технологический элемент шип – полость атмосферного давления на расплав стали в прибыли; условные обозначения: D – диаметр (мм) прибыли, H – высота (мм) прибыли, a – ширина (мм) одного канала горизонтального коллектора

9.4.2. В 1964 г. Г. М. Дубицкий и Л. А. Щегловитов предложили созданный и проверенный ими метод расчета оптимальной продолжительности заливки керамических форм по выплавляемым моделям [43], который вместе с описанной выше (п. 9.4.1.) технологией использования фильтровальных сеток из стеклоткани ([42], рис. 4) составил новую прогрессивную технологию литья по выплавляемым моделям.

9.4.3. Анализ названной выше (п. 9.4.2.) новой литниковой системы привел нас к выводу о том, что в этой литниковой системе с учетом рис. 4 имеется дренажный механизм поступления жидкого металла из коллектора в полость прибыли новой литниковой системы.

9.4.4. Новая литниковая система по п. 9.4.3. освоена и внедрена в 2006 г. в производство отливок детали Корпус на ГП ХМЗ «ФЭД».

9.5. Развитие понятий о функционировании прибыли в топологической модели элементарной отливки

9.5.1. Унификация материала элементарной отливки

Материал отливки детали Корпус – многокомпонентный сплав – сталь 14X17H2Л (п.8.1) мы с позиции концепции абсолютно простого (п.7.1.1) условно заменили на простой однокомпонентный материал – железо (100 %) с технологическими характеристиками в табл. 3.

Таблица 3. Технологические характеристики железа по стадиям формирования элементарной отливки для отливаемого изделия детали Корпус (рис. 4, п.8.1)

Номер стадии	Температура железа, °С			Плотность железа, г/см ³		
	обозначение	величина	литература	обозначение	величина	литература
I	T_0	1615	технология	$\rho_m(T_0)$	6,937	[44, с. 328]
II	T_1	1536 ж	[44, с. 317]	$\rho_m(T_1)$	7,035	[44, с. 317]
III	T_2	536 тв	[44, с. 317]	$\rho_m(T_2)$	7,265	[44, с. 317]
IV	T_2	20	–	$\rho_m(T_3)$	7,870	[45, с. 437]

9.5.2. Математическая модель подпитывания элементарной отливки

Созданная ранее базовая математическая модель (26) б, (28) б, (29) б в [32] и (32) б, (33) б – в [33] описывает в единой открытой системе [32, п.2.3; 33, п.3.1.5-3.1.7, 3.2] процесс образования усадочной пористости, усадочных раковин и усадки в гравитационных отливках.

Далее в указанную открытую систему мы дедуктивно вводим физический процесс подпитывания отливки от ее новой литниковой системы (п. 9.3; 9.4). В результате открытая литниковая система замыкается и может быть оптимизирована (п. 9.4).

Для этого еще в 1964 г. А. И. Вейник предложил понятие «дефицит металла в отливке» – то есть нехватка жидкого металла, связанная с его усадкой при изменении агрегатного состояния. Нехватка (дефицит) жидкого металла должна быть покрыта за счет питания отливки из стояка* [46, с. 164]. В данной работе дефицит металла обозначен символом W .

Понятие о дефиците металла в отливке было предложено А. И. Вейником 49 лет назад, теперь мы его развиваем следующим образом. Согласно физическому содержанию понятия о наружной усадочной пористости отливки [32, п.2.5.2], поступающий в отливку металл подпитки (или, что то же, дефицит металла в отливке) заполняет объем всех ее усадочных пор, перенося их этим наружу отливки, то есть

$$-V_{н.п.у}(T_{0-j}) = -W_y'(T_{0-j}), \quad (52)$$

где $j = 1, 2, 3; T_j < T_0$.

Тем самым с использованием условия (52) фиксируется, измеряется и ниже математически описывается физический процесс полного подпитывания отливки.

Теперь упростим запись выражения (11) из [32] для описания физического процесса полного подпитывания отливки

$$\Pi_{н.у}(T_{0-j}) = \frac{|-V_{н.п.у}(T_{0-j})|}{V_{от}(T_j)}, \quad (11)$$

*в настоящей работе – "за счет питания отливки из прибыли"

где $j = 1, 2, 3; T_j < T_0$; $||$ – знак абсолютной величины пористости (ее параметра) соответствует способу сравнения родов пористости в табл. 2 [32].

Далее левую часть выражения (52) подставляем в приведенную выше упрощенную запись определения наружной усадочной пористости (11) из [32]

$$\left| -W'_y(T_{0-j}) \right| = V_{от}(T_j) \Pi'_{н.у}(T_{0-j}), \quad (53)$$

где $j = 1, 2, 3; T_j < T_0$.

Полученное выражение (53) представляет собой функциональное уравнение, описывающее процесс подпитывания гравитационной отливки по стадиям ее формирования.

9.5.3. Геометрическая модель прибыли

Для расчета и проектирования оптимальной прибыли сначала задаемся ее геометрической моделью согласно рис. 5.

В предложенной нами конструкции прибыли на рис. 5 новой является поз.5 – технологический элемент шип – полость для подачи непосредственного атмосферного давления воздуха на расплав в прибыли, что позволяет указанную прибыль именовать атмосферной прибылью.

Место АЕ установки прибыли на отливке детали Корпус по рис. 5 выбираем из условия создания технологичной – при – литье конструкции отливки (вместе с ее прибылью) (26) б в [32]: от наиболее удаленных частей отливки до непосредственно прилегающих к прибыли.

9.5.4. Понятие о ядре прибыли

Будем различать сопряженные понятия о ядре – 1 прибыли, понятие о ядре – 2 прибыли и понятия о теплоизолирующей оболочке общего ядра прибыли.

Понятие о ядре – 1 прибыли количественно выражает объем металла (расплава), необходимый для полного подпитывания отливки с целью предотвращения образования в ней усадочных пор и усадочных раковин.

Понятие о ядре – 2 количественно выражает объем металла (расплава), необходимый для полного подпитывания ядра – 1 с целью создания возможности полного и надежного его функционирования.

9.5.5. Особенности подпитывания гравитационной отливки на четвертой стадии ее формирования

Понятие и стадии формирования отливки описаны в работе [32, п.2.2]. На этой основе металл подпитки для второй и третьей стадий формирования отливки поступает в отливку из прибыли. То есть в конце третьей стадии литейная форма «полна» металла и усадочных пустот в ней нет. В конце третьей стадии движение металла подпитки в литейной форме прекращается.

Следовательно, металл подпитки для четвертой стадии необходимо подать в литейную форму раньше. Для чего ее еще на этапе проектирования или доработки оснастки разделяют на k ($k = 1, 2, 3, \dots, N$) малых частей по результатам измерения их пористости [47] с использованием выражения (29) б из [32]. Выше N – общее количество выделенных малых частей отливки.

Указанное изменение объема k -й части отливки должно отвечать $\Delta V_{п.у}(T_{2-3}) k$ – изменению объема усадочных пор, образующихся в k -й части отливки на четвертой стадии ее формирования

$$\Delta V_{\phi}(T_{2-3})_k = \Delta V_{п.у}(T_{2-3})k. \quad (54)$$

В конечном итоге объем ядра прибыли должен быть таким, чтобы весь металл подпитки находился в исходном (при T_0) объеме прибыли. Тогда к началу четвертой стадии в литейной форме уже будет необходимое количество металла подпитки.

Затвердевание сплавов

Далее осуществляется простой физический процесс термического сжатия металла на месте и этим заканчивается процесс подпитывания отливки на четвертой стадии ее формирования.

9.5.6. Особенности работы атмосферной прибыли

Сначала, на первом этапе анализа работы атмосферной прибыли, определяем величину атмосферного давления воздуха на расплав стали в прибыли согласно понятию «атмосфера физическая» следующим образом.

Согласно [48, с. 37] атмосфера физическая (обозначение – атм) – это давление, создаваемое газообразной оболочкой Земли на 1 см^2 ее поверхности, стандартная величина которого принята равной 760 мм рт. ст. Отсюда можно записать

$$M_{\text{рт}} = V_{\text{рт}}(T) \rho_{\text{рт}}(T), \quad (55)$$

где $M_{\text{рт}}$ – масса столба ртути при температуре ее T , г; $V_{\text{рт}}(T)$ – объем столба ртути при температуре ее T , см^3 ; $\rho_{\text{рт}}(T)$ – плотность ртути при температуре ее T , $\text{г}/\text{см}^3$.

Далее для анализа выражения (55) мы дополнительно к работе [48] используем следующее пояснение Р. Р. Чугаева: «...имеются два разных способа выражения абсолютного «гидростатического давления в точке»: 1 – единицами сила/площадь...; 2 – единицами длины (единицами высоты) вертикального столба жидкости, характеризующейся определенной величиной плотности» [49, с. 44]. Поэтому если в (55) плотность столба ртути выразить в $\text{г}/\text{см}^3$, то из условия единства размерности высоту столба ртути следует записать 76 см, а площадь поперечного сечения столба ртути – равной 1 см^2 . В итоге величину объема столба ртути выражаем так

$$V_{\text{рт}}(T) = 1 \text{ см}^2 h_{\text{рт}}(T) \text{ см} = h_{\text{рт}}(T) \text{ см}^3, \quad (56)$$

где $h_{\text{рт}}$ – высота столба ртути при температуре T , см.

Теперь, на втором этапе анализа работы атмосферной прибыли, расплав стали в прибыли согласно п. 9.5.1 условно заменяем расплавом железа в прибыли и записываем для него аналогично (55), (56)

$$M_{\text{ж}} = V_{\text{ж}}(T) \rho_{\text{ж}}(T); \quad (57)$$

$$V_{\text{ж}}(T) = 1 \text{ см}^2 h_{\text{ж}}(T) \text{ см} = h_{\text{ж}}(T) \text{ см}^3, \quad (58)$$

где индекс ж указывает на принадлежность параметра к расплаву железа.

Атмосферному давлению воздуха на расплав стали в прибыли, измеряемому высотой ртутного столба по (55), (56), приравняем эквивалентное давление столба расплава железа по (57), (58) при температуре его $T_0 = 1615 \text{ }^\circ\text{C}$

$$h_{\text{рт}}(T_3) \text{ см}^3 \rho_{\text{рт}}(T_3) \text{ г}/\text{см}^3 = 1 \text{ см}^2 h_{\text{ж}}(T_0) \text{ см} = \rho_{\text{ж}}(T_0) \text{ г}/\text{см}^3.$$

Откуда высота столба расплава железа при T_0

$$h_{\text{ж}}(T_0) = \frac{h_{\text{рт}}(T_3) \rho_{\text{рт}}(T_3)}{\rho_{\text{ж}}(T_0)}. \quad (59)$$

Значения входных параметров для (59) следующие: высота ртутного столба равна 76 см; плотность ртути при 300 К (27 °С) принимаем по [50, с. 103 табл. 31] равной $\rho_{\text{рт}}(T_3) = 13,529 \text{ г}/\text{см}^3$. По этим данным на основании (59)

$$h_{\text{ж}}(T_0) = \frac{76 \text{ см} \cdot 13,529 \text{ г} / \text{см}^3}{6,937 \text{ г} / \text{см}^3} = 148,2 \text{ см}, \quad (59)\text{а}$$

То есть предложенный нами технологический элемент (углубление поз.5 на рис. 5) может обеспечить непрерывное давление атмосферы воздуха на расплав железа в оптимальной прибыли высотой 4,5 см – далее по (62), которое в 32,9 раза (148,2 см: 4,5 см) превышает собственное гидростатическое давление расплава железа.

Названные новые технологические решения освоили и внедрили в производство отливок детали Корпус на ГП ХМЗ «ФЭД». Как следует из рис. 5, через указанное углубление атмосферный воздух вместе с частью керамической формы «проваливается» в жидкий металл, вытесняет его из горизонтального коллектора в прибыль и далее – в отливаемое изделие.

В других моделях атмосферной прибыли (Й. Пржибыла [51, с. 101-113] и Э. Книппа [52, с. 23-24]) для создания атмосферного давления воздуха на расплав металла в прибыли требуется дополнительно изготовить специальный газопроницаемый стержень и установить его в литейную форму, на что необходимы дополнительные затраты.

Предложенная новая модель атмосферной прибыли является интенсивной, адаптивной и оптимальной (по наименьшим затратам времени и средств на ее реализацию).

9.5.7. Сущность оптимизационного условия «...при наименьшем достаточном расходе металла на прибыль» в задаче по разделу 6 раскрывается следующим образом.

Согласно развитой нами науке о литье [32, п.2.5.2] и приведенным выражениям (52), (53), расход металла на прибыль элементарной отливки определяется ее физическим свойством – величиной наружной усадочной пористости в топологической модели элементарной отливки [33, п.3.1.5]. В этих условиях расход металла на прибыль физически может быть только наименьшим и при этом достаточным, что и отражено в наименовании задачи раздела 6.

Для достижения названной выше цели далее выполняются необходимые исследования и разрабатывается метод расчета и проектирования оптимальной прибыли для элементарной отливки на примере сложной отливки для детали Корпус (п.8.1).

10. Метод расчета-проектирования оптимальной прибыли для топологической модели элементарной отливки детали Корпус

10.1. Оптимизационные упрощения

10.1.1. Предлагаемый метод разработан и используется на основе топологической модели элементарной отливки [33, с. 16-17] для отливаемого изделия, что повышает надежность и сокращает затраты времени и средств на создание оптимальной прибыли для отливки.

10.1.2. Выше в названии метода по п. 10 мы, согласно А. Н. Гвоздеву [41, с. 297], ввели двойные тире как указывающие на важность и связность заключенных в них элементов.

10.2. Изложение метода расчета-проектирования оптимальной прибыли для отливки

10.2.1. Согласно п. 9.5.2 поступающий в отливку металл подпитки (или, что то же, дефицит металла в отливке) заполняет объем всех ее усадочных пор, перенося их этим наружу отливки по условию

$$-V_{н.п.у}(T_{0-j}) \equiv -W'_y(T_{0-j}), \quad (52)$$

где $j = 1, 2, 3; T_j < T_0$.

10.2.2. Для выполнения названных расчетов приводим из п. 7.2.3 выражение наружной усадочной пористости

$$\Pi'_{н.у}(T_{0-3}) = - \left[\frac{\rho_{от}(T_3)}{\rho_м(T_0)} - 1 \right]. \quad (33)б$$

10.2.3. Выписываем из п. 9.5.2. выражение (53)

$$\left| -W'_y(T_{0-j}) \right| = V_{от}(T_j) \Pi'_{н.у}(T_{0-j}), \quad (53)$$

где $j = 1, 2, 3; T_j < T_0$.

10.2.4. Определяем для (53) значение его сомножителей. Первый сомножитель

$$V_{от}(T_3) = \frac{M_{от}(T_3)}{\rho_{от}(T_3)} = \frac{900 \text{ г}}{7,87 \text{ г/см}^3} = 114,3583 \text{ см}^3,$$

где 900 г – по п. 8.1; 7,87 г/см³ – из табл. 3. Второй сомножитель в (53) находим по (33) б с использованием входных параметров из табл. 3

$$\Pi'_{н.у}(T_{0-3}) = - \left[\frac{7,83}{6,937} - 1 \right] = -0,1345.$$

Численные значения сомножителей подставляем в (53), перемножаем, полученное выражение согласно п. 9.5.2 трактуем как количество металла подпитки, поступающее в отливку извне, которое становится положительной величиной

$$V_{м.лд}(T_3) = 114,3583 \text{ см}^3 \cdot 0,1345 = 15,3812 \text{ см}^3.$$

10.2.5. На основе п. 10.2.1-10.2.4 формулируем понятие оптимальной прибыли в топологической модели элементарной отливки [33, п.3.1.5].

Для чего сначала дефициту металла в отливке и дефициту металла в прибыли придаем общую цилиндрическую форму ядра прибыли по условию

$$H = D, \quad (60)$$

где H – высота (см); D – диаметр (см) прибыли определяют объем поступающего в отливку металла подпитки (дефицит металла). При этом пользуемся понятием геометрической модели прибыли (п. 9.5.3) и понятием о ядре прибыли (п. 9.5.4)

$$W'_y(T_{0-3}) = \frac{\pi \cdot D^2}{4} H = \frac{\pi \cdot D^3}{4}, \quad (61)$$

откуда

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} W'_y(T_{0-3})}. \quad (62)$$

Затвердевание сплавов

Далее результаты расчета (53) подставляем в (62), проектируя этим оптимальную прибыль для отливки детали Корпус (п. 8.1) в рассматриваемом температурном интервале от T_0 до T_3

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{\pi} V_y (T_3) \Pi'_{н.у}(T_{0-3})}. \quad (63)$$

Таким образом, в нашей задаче «научное понятие оптимальная прибыль для отливки» детали Корпус определяется комплексом математических выражений (60)-(63).

10.3. Расчет-проектирование теплоизоляционной оболочки для создаваемой прибыли

Названный расчет-проектирование производим на основе исследований А. Н. Цибрика по применению теплоизоляционных оболочек, выполненных в виде стержней-стаканов или облицовочного слоя прибыльной части формы [53]. В качестве материала теплоизоляционной оболочки используем металл изготавливаемой отливки – хромистую сталь (п. 8.3) в условиях технологичной – при – литье конструкции отливки детали Корпус (п.9.3.6).

10.3.1. Сначала по формуле (63) с использованием входных данных п. 10.2.4 определяем расчетный диаметр создаваемой прибыли

$$D = \sqrt[3]{\frac{4}{3,141593} 114,3583 \cdot 0,1345} = 2,696 \text{ см} \approx 27 \text{ мм}. \quad (63) \text{ а}$$

Согласно выражению (60)

$$H_p = 27 \text{ мм},$$

где индекс p означает расчетный диаметр прибыли, расчетную высоту прибыли.

10.3.2. Затем теплоизоляционной оболочкой накрываем расчетную (63) а прибыль. При этом

$$D_{об} = D_p + 2\delta_{об}, \quad (64)$$

где $D_{об}$ – диаметр оболочки, мм; $\delta_{об}$ – толщина оболочки, мм.

Физическое назначение оболочки – замедлить охлаждение прибыли, что технологически можно достичь как увеличением толщины оболочки, так и повышением температуры заливаемой стали.

10.3.3. Экспериментальные исследования выполнены на ГПХМЗ «ФЭД» согласно «Методике от 23.01.2006 г. изготовления опытных партий отливок детали Корпус по новой оснастке и усовершенствованным технологиям».

В результате исследований температура заливки хромистой стали 14Х17Н2Л принята равной 1620 °С.

Партии отливок детали Корпус диаметром (и высотой) прибыли 50, 45 и 35 мм формировались одновременно: каждая партия – на одном треугольном коллекторе.

Итоги рентген-контроля указанных отливок детали Корпус следующие: все отливки с прибылью диаметром 50 и 45 мм – годные (брак равен нулю). Качество тех же отливок, но только с прибылью диаметром 35 мм, выявились нестабильным. Так, в плавке № 462 от 25.12.2004 г. зафиксировали 73 % годных отливок и 27 % бракованных.

10.3.4. Идентификация оптимальной прибыли для отливки

Полученные результаты объясняем следующим образом: расчетный диаметр прибыли D_p по (63) а равен 27 мм и определяет границу, через которую в отливку детали Корпус должен поступать металл подпитки. Тогда толщина оболочки из (64)

$$\delta_{об} = \frac{D_{об} - D_p}{2} \quad (65)$$

становится толщиной своеобразного кольцевого питателя.

В этой ситуации критические условия в процессе подпитывания отливки детали Корпус складываются, когда рассматриваемая оболочка проходит по наружному диаметру прибыли, то есть при

$$D_{об} = D_{пб}, \quad (66)$$

где $D_{пб}$ – наружный диаметр прибыли:

$$D_{пб(1)} = 35 \text{ мм}; \quad (67)$$

$$D_{пб(2)} = 45 \text{ мм}; \quad (68)$$

$$D_{пб(3)} = 50 \text{ мм}. \quad (69)$$

В данном случае толщину кольцевого питания можно выразить так:

$$\delta_{пт} = \frac{D_{об} - D_p}{2} \quad (70)$$

или для условий (67)-(69)

$$\delta_{пт(1)} = \frac{35 - 27}{2} = 4 \text{ мм}; \quad (71)$$

$$\delta_{пт(2)} = \frac{45 - 27}{2} = 9 \text{ мм}; \quad (72)$$

$$\delta_{пт(3)} = \frac{50 - 27}{2} = 11,5 \text{ мм}. \quad (73)$$

Таким образом, толщина кольцевого питателя прибыли диаметром 45 мм существенно (в $9:4 = 2,25$ раза) больше, чем у прибыли диаметром 35 мм, что и определяет выявленное оптимальное влияние прибыли диаметром 45 мм и высотой 45 мм на формирование плотности отливок детали Корпус. Эта прибыль была освоена и внедрена в производство.

10.4. Создан метод расчета-проектирования оптимальной прибыли для отливки

10.4.1. Указанный метод основан на использовании «научного понятия о наружной усадочной пористости [32, п. 2.5.2]», которое было введено В. Г. Кострицей в 1974 г. [7, с. 27-28] и разработано им в работах [8, 9].

10.4.2. Предлагаемый метод повышает качество отливок

Сказанное наглядно подтверждают приведенные в табл. 4 результаты рентген-контроля качества отливок детали Корпус, серийно изготавливаемых в литейном цехе ГП ХМЗ «ФЭД» по новым технологическим решениям, изложенным выше в разделах 9.3, 9.4, 9.5.

Как видно из табл. 4, за 5 последних лет брак в производстве отливок детали Кор-

Таблица 4. Результаты рентген-контроля качества отливок детали Корпус

Дата поступления отливок на контроль за 2007-2011 гг.	Количество отливок, шт.	Результаты контроля		
		годных, %	брак, %	количество случаев, где брак равен нулю
2007	728	81,3	18,7	1
2008	517	88,0	12,0	–
2009 на 10.12.2009 г.	229	89,0	11,0	3
2010	861	95,1	4,9	3
2011	902	94,3	5,7	10

пус снизился от 18,7 до 5,7 %, то есть уменьшился в 3,3 раза. При этом появились случаи, когда в изготовленной партии отливок брак равен нулю: за 2007 г – 1 случай, за 2011 г – 10.

10.4.3. Качество ранее (до сентября 2005 г.) изготовленных отливок:

– по исследованиям п. 8.4 брак в производстве отливок детали Корпус ранее составлял около 60 %;

– главная причина указанного брака – недостатки директивной литниковой системы предложенной в апреле 1982 г. для ГП ХМЗ «ФЭД» (выше п. 9.2);

– необходимая новая литниковая система для формирования плотных отливок детали Корпус описана и подтверждена в разделе 9.3.

Заключение

- Следовательно, изложенная в разделе 6 «Задача о формировании плотных гравитационных отливок при наименьшем достаточном расходе металла на прибыль» решена.

- Далее, согласно концепции по п. 7.1.3, решение нашей задачи должно быть доказано. Для чего предложенное решение задачи разделяем на две части: технологическая – о формировании плотных гравитационных отливок; математическая – при наименьшем достаточном расходе металла на прибыль.

- Доказательством истинности решения технологической части задачи являются факты рентген-контроля качества изготовленных отливок по данным п. 10.4.2, табл.4.

- Доказательством истинности решения математической части задачи является функционирование математической модели (53) по п.10.2.3 в технологическом процессе формирования отливки. Здесь левая часть выражения (53) характеризует расход металла на прибыль для отливки, а правая определяет необходимое количество металла для подпитывания отливки.

- Наконец, вводим наименование научно-технической продукции – «научное понятие оптимальная прибыль для отливки, определяемая комплексом математических выражений (60)-(63)», созданной совместно О. А. Кострицей и В. Г. Кострицей в порядке обсуждения.

Условные обозначения

Символы: М – масса, кг; П – пористость; ρ – плотность, кг/м³; τ – время (продолжительность цикла изготовления отливки), с; T – температура, К; U – усадка; V – объем, м³; ε – критерий сжатия; ξ – число сжатия.

Индексы нижние (буквы): зал – заливка; i – начало стадии изготовления отливки; j – окончание стадии изготовления отливки; м – металл; н – наружная; об – общее значение; от – отливка; п – пора; у – усадочная; ф – форма.

Индексы нижние (цифры): 0 – начальное значение температуры в момент окончания заполнения полости формы металлом и образования отливки; 1, 2, 3 – последующие значения температуры металла соответственно: 1 – ликвидус, 2 – солидус, 3 – окружающая среда.

Индексы верхние (штрихи): / (один штрих) – меньшее значение параметра, // (два штриха) – большее значение параметра.

Примеры обозначений: $V_{п.у}(T)$ – объем усадочных пор в отливке при температуре ее T , м³; $V_{п.у}(T_{1,2})$ – объем усадочных пор в отливке при температуре T_2 , образованных в процессе охлаждения ее от T_1 до T_2 , м³; Π' – пористость отливки, части ее, измеренная (выраженная) в разностной форме.



Список литературы

32. Кострица В. Г., Кострица О. А. Развитие формул Нехендзи-Гиршовича в науке о литье. Сообщение 1 // Процессы литья. – 2010. – № 2. – С. 25-35.
33. Кострица В. Г., Кострица О. А. Развитие формул Нехендзи-Гиршовича в науке о литье. Сообщение 2 // Там же. – 2010. – № 3. – С. 16-23.
34. Нехендзи Ю. А., Иванов В. Т. Выбор условий моделирования для изучения образования усадочных раковин в отливках // Материалы научно-технической конференции по теории и практике процессов литья. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1967. – С. 34-48.
35. Фатеев В. А., Ипатов Н. К. Сравнение различных методов расчета прибылей // Литейн. пр-во. – 1962. – № 3. – С. 32-35.
36. Попов А. Д. Расчет прибылей стальных отливок // Там же. – 1971. – № 4. – С. 37.
37. Денисов В. А., Костенецкий С. В., Сторожук В. А. Инженерный метод расчета прибылей стальных отливок // Там же. – 1981. – № 1. – С. 19-20.
38. Гегель Г. В. Ф. Наука логики. – М.: Мысль, 1972. – Т. 3. – 371 с.
39. Носков Б. А., Смеляков Н. Н. Конструирование литых деталей. – Киев; М.: Машгиз, 1957. – 212 с.
40. Петриченко А. М. Тонкостенные кокильные отливки. – Киев; М.: Машгиз, 1957. – 164 с.
41. Гвоздев А. Н. Современный русский литературный язык. Синтаксис. – М.: Учпедгиз, 1958. Ч. II. – 302 с.
42. Ярополов И. И., Павлова Г. М., Шарапов И. М. Фильтрация металла при литье по выплавляемым моделям // Литейн. пр-во. – 1976. – №12. – С. 34.
43. Дубицкий Г. М., Щегловитов Л. А. Оптимальная продолжительность заливки холодных форм отливок по выплавляемым моделям // Там же. – 1964. – №11. – С. 1-2.
44. Арсентьев П. П., Коледов Л. А. Металлические расплавы и их свойства. – М.: Metallurgia, 1976. – 376 с.
45. Смитлз К. Дж. Металлы: Справочник / Пер. с англ. – М.: Metallurgia, 1980. – 447 с.
46. Вейник А. И. Расчет отливки. – М.: Машиностроение, 1964. – 404 с.
47. Кивилис С. С. Техника измерения плотности жидкостей и твердых тел. – М.: Стандартгиз, 1959. – 192 с.
48. Политехнический словарь / Под ред. И. И. Артоболевского. – М.: Советская энциклопедия, 1977. – 608 с.
49. Чугаев Р. Р. Гидравлика: Учебник для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленинград. отд-ние, 1982. – 672 с.
50. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах: Справочник. – М.: Metallurgia, 1980. – 384 с.
51. Пржибыл Й. Затвердевание и питание отливок: Пер с чеш. – М.: Машгиз, 1957. – 288 с.
52. Книпп Э. Пороки отливок: Пер с нем. – М.: Машгиз, 1958. – 276 с.
53. Цибрик А. Н. Теплоизоляционные оболочки для прибылей // Литейн. пр-во. – 1961. – № 6 – С. 14.

Поступила 10.01.2014