УДК 621.74

О МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ПРИБЫЛЕЙ ОТЛИВОК

Денис Васильевич Романов

Студент 6 курса,
кафедра «Литейные технологии и оборудование»
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: А.Ю.Коротченко,
К.т.н., доцент кафедры «Литейные технологии и оборудование»

В процессе проектирования технологического процесса изготовления отливки инженер-технолог сталкивается с множеством вопросов: выбор места подвода металла, назначение технологических напусков, обеспечение направленного затвердевания и питания отливок, обеспечение заполняемости полости формы и др. Одним из наиболее важных этапов в этой последовательности, безусловно, является вопрос обеспечения питания тепловых узлов отливки. На данном этапе инженер-технолог должен выбрать место установки прибыли, конфигурацию прибыли и рассчитать ее размеры с целью исключения возникновения усадочных дефектов в отливке.

В настоящее время разработаны различные инженерные методы расчета прибылей. Часть из них связывает приведенный размер отливки (узла) и прибыли, часть – объем прибыли и питаемой отливки (узла). Большинство из данных соотношений найдено либо эмпирическим, либо полуэмпирическим способом. Рассмотрим некоторые из наиболее распространенных методов расчета прибылей.

Метод Пржибла

Связывает объем прибыли с объемом отливки или узла отливки соотношением

$$V_{пр} = \frac{x \cdot \beta}{1 - x \cdot \beta} \cdot V_0, \qquad (1)$$

где x - коэффициент неэкономичности прибыли, ($3 < x < 12$), β - коэффициент усадки металла, V_0 - объем отливки или узла отливки.

Коэффициент неэкономичности прибыли x для открытой атмосферной прибыли автор рекомендует от 9 до 12, для закрытой атмосферной - от 7,5 до 9, для экзотермических прибылей x = 3-4.

Метод Бишопа – Джонсона

Разработан авторами для отливок типа плит и стержней.

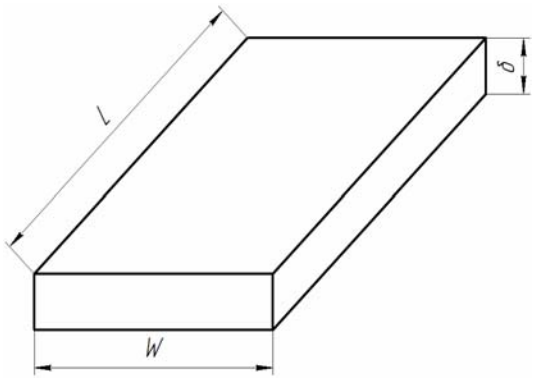

Рис. 1. Отливка «Плита».

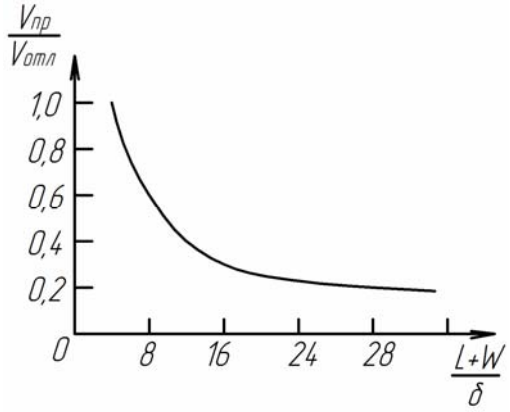

Рис. 2. Номограмма Бишопа-Джонсона.

Вычисляется фактор формы плиты (см. рис 1) $\frac{L+W}{\delta}$ и далее по номограмме (см. рис 2) вычисляется рекомендуемое соотношение объем прибыли и объема отливки или узла отливки.

Рекомендуемая форма прибыли – цилиндрическая с отношением высоты H к диаметру D в пределах $0.5 \le \frac{H}{D} \le 1.0$.

Метод Чеботарева – Чикунова

Метод основан на системотехническом описании конфигурации фасонной отливки. Подробно разобран в работе [1]. Фасонная отливка представляется как система из прибылей и прямоугольных параллелепипедов, составляющих конфигурацию отливки. Прибыль отливки рассчитывается по коэффициенту прибыли $K = \frac{V_n}{V_0}$, где V_n - объем искомой прибыли, V_0 - объем отливки (узла отливки). Коэффициент K находится эмпирически для каждой конфигурации прибыли – куб, параллелепипед, цилиндр.

Результаты статистического анализа Кремера

Метод связывает приведенный размер прибыли с приведенным размером отливки применительно для литья в песчаные формы. Результаты статистического исследования большого количества отливок автор свел в номограмму (см. рис 3) для разных способов заливки формы:

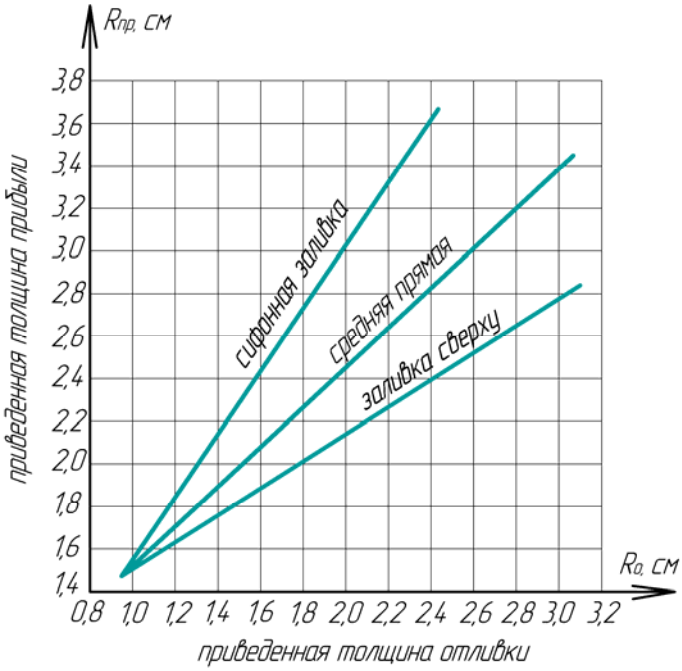

Рис. 3. Номограмма Кремера.

Из диаграммы видно:

- для сифонной заливки $R_{пр} = 1.5 \cdot R_0$
- для заливки сверху $R_{пр} \approx 0.9 \cdot R_0$
- для комбинированного подвода металла $R_{пр} \approx 1.14 \cdot R_0$

Рекомендации Ю.А.Нехендзи

В работе [2] автор приводит следующие соотношения для приведенных размеров отливки и прибыли:

$R_{пр} = (1.1 \div 1.25) \cdot R_0$ - для обычных прибылей,

$R_{пр} = 1.1 \cdot R_0$ -для легкоотделяемых прибылей,

где R_0 - приведенный размер отливки или питаемого узла,

Также в этой же работе автор приводит следующую номограмму (см. рис 4), полученную на Уралмашзаводе:

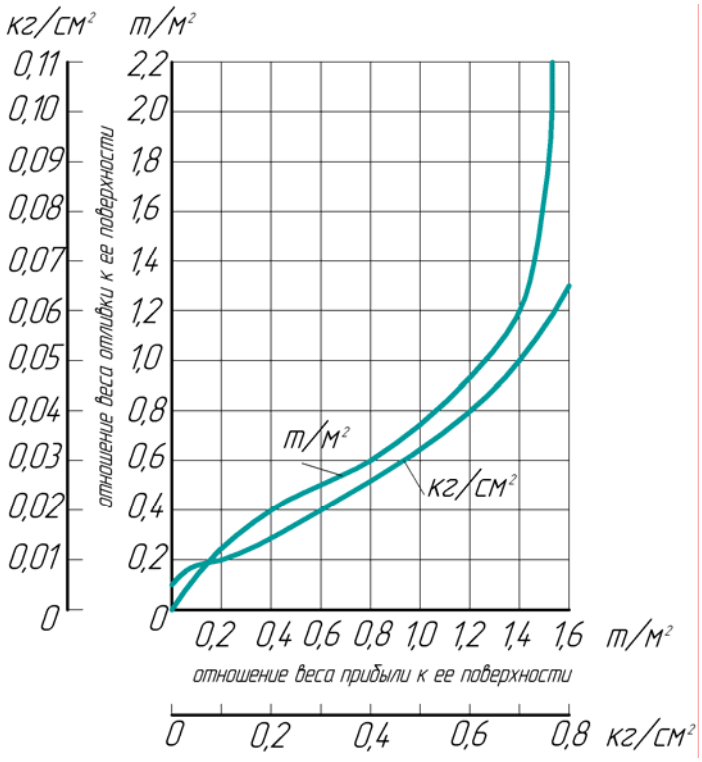

Рис. 4. Номограмма Уралмашзавода.

Метод Н.М.Галдина

Связывает приведенный размер узла отливки типа «Плита» с приведенным размером прибыли. В работе [3] автор приводит следующий метод расчета:

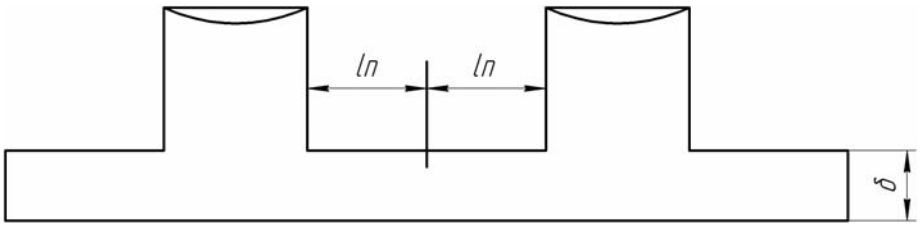

Рис. 5. Расчетная схема

Отношение $\frac{R_{пр}}{R_0}$ есть функция длины питания прибыли l_n и толщины отливки δ:

$$\frac{R_{пр}}{R_0} = \psi(\frac{l_n}{\delta}) \qquad (2)$$

Например, для углеродистой стали $l_n = (2 \div 3) \cdot \delta$ и $\frac{R_{пр}}{R_0} = \psi(\frac{l_n}{\delta}) = 1.0$

В работе [4] также рассматривается задача расчета прибылей для отливок типа плит и стержней. Авторы используют фактор формы плиты (см. рис 1) $\frac{L+W}{\delta}$ для вычисления отношения объема прибыли к объему отливки (узла отливки). Для стали AISI 1025 (20Л) для литья в фурановые формы при перегреве 60 °С найдено следующее соотношение:

$$\frac{V_n}{V_0} = 2.51 \cdot (\frac{L+W}{\delta})^{-0.74} \quad (3)$$

Кроме того, авторы приводят эмпирические коэффициенты для анализа длины питания прибыли для других условиях литья.

Выводы:

Как видно из представленного выше обзора все существующие методики расчета прибылей связывают либо приведенный размер питаемого узла и прибыли (первый класс), либо их объемы (второй класс).

Методики, в которых используются приведенные размеры, дают приведенный размер прибыли как $R_{пр} = k \cdot R_0$, где R_0 - приведенный размер узла отливки, k - коэффициент запаса. Коэффициент запаса в рассмотренных методиках лежит в пределах $k = 1.0 \div 1.5$.

Второй класс методик в явном виде связывает только объемы элементов (через коэффициент прибыли). Однако в неявном виде существует и связь приведенных размеров.

Действительно, рассмотрим отливку в виде плиты (см. рис 1) с размерами L = 800 мм, W = 400 мм, δ = 40 мм. Для стандартных условий работы 4 объем прибыли составит $V_n = 2.51 \cdot (\frac{L+W}{\delta})^{-0.74} \cdot V_0 = 0.203 \cdot V_0$. При этом приведенный размер отливки можно принять $R_0 = \frac{\delta}{2} = 20$ мм, при цилиндрической форме прибыли с отношением $\frac{H}{D} = 1$ получаем приведенный размер прибыли $R_{пр} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot H + \pi \cdot D^2} = 30$ мм. То есть $\frac{R_{пр}}{R_0} = \frac{30}{20} = 1.5$. Связь объема прибыли и объема отливки неявно подразумевает выполнение условия $R_{пр} = k \cdot R_0$, где $k = 1.5$.

Таким образом, при расчете прибыли задача фактически сводится к заданию коэффициента запаса k, с помощью которого можно рассчитать приведенный размер прибыли $R_{пр}$. При этом для обычной прибыли всегда $k \geq 1.0$.

Это легко объяснимо с позиции выполнения основной функции прибыли – питания отливки за счет более позднего затвердевания в сравнении с питаемым объемом. Как известно, время затвердевания элемента пропорционально квадрату приведенного размера.

При кажущейся легкости расчета прибылей по рассмотренным методикам существовала главная трудность в их использовании – назначение коэффициента запаса k. Данная трудность разрешалась во всех перечисленных методах на основе производственных и экспериментальных данных, т.е. k подбирался эмпирически. При этом для каждого вида сплавов приходилось ставить новые эксперименты и находить k.

Такой подход кажется достаточно трудоемким.

Целью данной работы ставилась задача теоретически найти коэффициент запаса k.

Теоретическое определение коэффициента запаса

Основная задача прибыли – питание жидким расплавом отливки при затвердевании с целью компенсации объемной усадки. Питание отливки обеспечивается более поздним затвердеванием прибыли относительно питаемого узла. Это главное условие работоспособности прибыли.

В общем виде время затвердевания произвольного элемента t_3 складывается из двух величин: времени снятия перегрева t_1 и собственно времени затвердевания. На основе модели малой интенсивности охлаждения для условий литья в ПФ для сплавов типа твердый раствор время снятия перегрева равно:

$$t_1 = \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} \right]^2, \quad (4)$$

где c_1 - удельная теплоемкость расплава, ρ_1 - плотность расплава, R - приведенный размер элемента, $b_ф$ - коэффициент тепловой аккумуляции формы; $T_{зал}, T_L, T_{фн}$ - температура заливки, ликвидус расплава и начальная температура формы соответственно.

Время до достижения некоторой температуры T_2 расплава в двухфазной области равно:

$$t_2 = \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot R \cdot (T_L - T_2)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right]^2, \quad (5)$$

где $c_{эф}$ - эффективная удельная теплоемкость, ρ_2 - плотность расплава в интервале затвердевания, T_S - температура солидус расплава.

Для сплавов типа твердый раствор при линейной модели содержания твердой фазы в интервале кристаллизации можно записать:

$$f_s = \frac{(T_L - T_2)}{(T_L - T_S)} \quad (6)$$

$$T_L - T_2 = f_s \cdot (T_L - T_S) \quad (7)$$

Здесь следует отметить, что модель малой интенсивности охлаждения пренебрегает перепадом температуры по сечению отливки, т.е. $T_2 = \psi(t)$ - температура двухфазной зоны зависит только от времени. Из (6) при таком подходе получаем, что $f_s = const$ по всему сечению отливки (элемента отливки).

Подставляя (7) в (5), получим:

$$t_2 = \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (R \cdot f_s) \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right]^2 \quad (8)$$

Таким образом, для элемента отливки с приведенным размером R_0 в любой момент времени затвердевания справедливо:

$$t_2 = \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_0 \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (R_0 \cdot f_{s0}) \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right]^2, \quad (9)$$

где f_{s0} - доля твердой фазы в элементе отливки в данный момент времени.

Аналогично для прибыли:

$$t_2 = \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{пр} \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (R_{пр} \cdot f_{snp}) \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right]^2, \quad (10)$$

где f_{snp} - доля твердой фазы в прибыли в данный момент времени.

С учетом приведенных рассуждений для некоторого момента времени справедливо:

(11)

$$\left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_0 \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (f_{s0} \cdot R_0) \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right]^2 = \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot R_{пр} \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (f_{snp} \cdot R_{пр}) \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right]^2$$

Преобразовывая (11), получим далее:

(12)

$$\left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (f_{s0}) \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right] \cdot R_0 = \left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (f_{snp}) \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \right] \cdot R_{пр}$$

$$\frac{R_{пр}}{R_0} = \frac{\left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \cdot f_{s0} \right]}{\left[\frac{c_1 \cdot \rho_1 \cdot (T_{зал} - T_L)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_L - T_{фн})} + \frac{c_{эф} \cdot \rho_2 \cdot (T_L - T_S)}{1.13 \cdot b_ф \cdot (T_S - T_{фн})} \cdot f_{snp} \right]} \quad (13)$$

Выражение (13) связывает приведенный размер прибыли и отливки через теплофизические параметры сплава и формы, а также параметры технологии изготовления отливки ($T_{зал}$, $T_{фн}$). Важно отметить, что отношение приведенных размеров прибыли и отливки полностью зависит от величин: f_{s0} - доля твердой фазы в элементе отливки, f_{snp} - доля твердой фазы в прибыли (в некоторый момент времени).

В процессе питания расплав из прибыли поступает в отливку сначала беспрепятственно, а затем по мере охлаждения фильтруется сквозь сетку растущих кристаллов, образовавших неподвижный скелет.

Фильтрационные явления затрудняют питание и в полной мере определяют качество питания. Согласно современным представлениям существуют некоторые пороговые значения твердой фазы, при которых начинается и заканчивается фильтрация расплава. Так, для большинства углеродистых сталей доля твердой фазы начала фильтрации $f_{s1} = 0.3$, а конца фильтрации - $f_{s2} = 0.7$ при литье в ПФ.

На момент окончания фильтрации в элементе отливки доля твердой фазы $f_{s0} = f_{s2}$, а в прибыли - некоторое f_{snp}. Из (13) на момент окончания фильтрации в узле получим:

$$\frac{R_{пр}}{R_0}=\frac{\left[\frac{c_1\cdot\rho_1\cdot(T_{зал}-T_L)}{1.13\cdot b_ф\cdot(T_L-T_{фн})}+\frac{c_{эф}\cdot\rho_2\cdot(T_L-T_S)}{1.13\cdot b_ф\cdot(T_S-T_{фн})}\cdot f_{s2}\right]}{\left[\frac{c_1\cdot\rho_1\cdot(T_{зал}-T_L)}{1.13\cdot b_ф\cdot(T_L-T_{фн})}+\frac{c_{эф}\cdot\rho_2\cdot(T_L-T_S)}{1.13\cdot b_ф\cdot(T_S-T_{фн})}\cdot f_{snp}\right]} \tag{14}$$

Из (14) следует, что для того, чтобы отношение $\frac{R_{пр}}{R_0}\geq 1$, необходимым условием является $f_{snp}\leq f_{s2}$.

Зная теплофизические параметры сплава и формы, а также технологии, задавшись f_{snp} и f_{s2}, по формуле (14) можно вычислить приведенный размер прибыли.

Более наглядной и простой становится методика расчета при следующих соображениях. Время снятия перегрева намного меньше времени затвердевания (считаем, что весь расплав полностью теряет перегрев на стадии заполнения формы), поэтому в выражении (5) слагаемым снятия перегрева можно пренебречь.

Тогда из (11) получим простое соотношение:

$$\left[\frac{c_{эф}\cdot\rho_2\cdot(f_{s0}\cdot R_0)\cdot(T_L-T_S)}{1.13\cdot b_ф\cdot(T_S-T_{фн})}\right]^2=\left[\frac{c_{эф}\cdot\rho_2\cdot(f_{snp}\cdot R_{пр})\cdot(T_L-T_S)}{1.13\cdot b_ф\cdot(T_S-T_{фн})}\right]^2 \tag{15}$$

$$\left[f_{s0}\cdot R_0\right]^2=\left[f_{snp}\cdot R_{пр}\right]^2 \tag{16}$$

$$f_{s0}\cdot R_0=f_{snp}\cdot R_{пр}, \tag{17}$$

где f_{s0}- доля твердой фазы в объеме элемента отливки в некоторый момент времени, f_{snp}- доля твердой фазы в объеме прибыли в этот же момент времени

На момент окончания фильтрации в отливке получим:

$$\frac{R_{пр}}{R_0}=\frac{f_{s2}}{f_{snp}} \tag{18}$$

Соотношение (18) в отличие от (14) имеет более простой вид и связывает приведенный размер прибыли с приведенным размером питаемого узла только через параметры фильтрации расплава - f_{snp} и f_{s2}.

Полученное выражение (18) полностью аналогично рассмотренным ранее $R_{пр}=k\cdot R_0$, если принять коэффициент запаса $k=\frac{f_{s2}}{f_{snp}}$. Однако оно несет иную смысловую нагрузку. В рассмотренных методиках коэффициент k подбирается эмпирически, а в приведенных рассуждениях – вычисляется на основе свойств сплава и технологии изготовления отливки.

Оценим порядок величин $\frac{R_{пр}}{R_{отл}}$ и f_{snp} на примере проектирования прибыли для отливок типа «Плита» с различными размерами (см. табл. 1)

по различным методикам. Прибыль цилиндрической формы с отношением диаметра к высоте $\frac{D_{пр}}{H}=1.0$.

Таблица 1. Результаты расчета прибылей.

№	L, мм	W, мм	δ, мм	$\frac{V_{пр}}{V_{отл}}$			$\frac{R_{пр}}{R_{отл}}$	f_{snp}
				1	2	3	*	**
1	300	300	50	0,4	0,4	0,43	1,327	0,53
2	300	300	100	0,6	0,67	0,80	1,254	0,56
3	1000	300	300	0,9	0,85	0.76	1,258	0,56
4	1000	500	300	0,9	0,76	0.82	1,229	0,57
5	1000	500	100	0,3	0,34	0.35	1,330	0,53

1 – рассчитано по методу Бишопа-Джонсона
2 – рассчитано с использованием формулы (3)
3 – рассчитано по методу Чеботарева-Чикунова

* - рассчитано для прибыли с отношением $\frac{V_{пр}}{V_{отл}}$ по Бишопу-Джонсону

** - рассчитано по формуле (18) при $f_{s2}=0.7$

Как видно из таблицы 1 соотношение $\frac{R_{пр}}{R_{отл}}$ во всех случаях больше 1 и примерно одинаково для различных отливок: $\frac{R_{пр}}{R_{отл}}=1.229\div1.330$.

Разработанный аппарат легко применим и к вопросу расчета экзотермических прибылей. Материал экзотерической смеси имеет намного меньший коэффициент тепловой аккумуляции $b_{Э.С}$, чем обыкновенная формовочная смесь. Из (15) в этом случае получим:

$$\left[\frac{c_{эф}\cdot\rho_2\cdot(f_{s0}\cdot R_0)\cdot(T_L-T_S)}{1.13\cdot b_{ф}\cdot(T_S-T_{фн})}\right]^2=\left[\frac{c_{эф}\cdot\rho_2\cdot(f_{snp}\cdot R_{пр})\cdot(T_L-T_S)}{1.13\cdot b_{Э.С}\cdot(T_S-T_{фн})}\right]^2 \quad (19)$$

$$\left[\frac{(f_{s0}\cdot R_0)}{b_{ф}}\right]=\left[\frac{(f_{snp}\cdot R_{пр})}{b_{Э.С}}\right] \quad (20)$$

Из (20) получим простое соотношение приведенных размеров экзотермической прибыли и питаемого узла на момент окончания фильтрации в нем:

$$\frac{R_{пр}}{R_0}=(\frac{f_{s2}}{f_{snp}})\cdot(\frac{b_{Э.С}}{b_{ф}}) \quad (21)$$

В отличие от формулы (18) для экзотермических прибылей появляется дополнительный сомножитель $(\frac{b_{Э.С}}{b_{ф}})$, связывающий теплофизические параметры экзотермического стакана прибыли и формы.

Оценим отношение $\frac{R_{пр}}{R_0}$ для экзотермической прибыли.

На основе теплофизических свойств экзотермической и фурановой смеси, полученных из банка материалов САПР LVMFlow, получим: $b_{Э.С} = 692\ \frac{Вт \cdot с^{\frac{1}{2}}}{м^2 \cdot К}$, $b_{ф} = 1400\ \frac{Вт \cdot с^{\frac{1}{2}}}{м^2 \cdot К}$. Из рассмотренных ранее примеров для прибылей отливок типа «Плита» (см. таблицу 1) получено, что достаточным является запас $\frac{f_{s2}}{f_{snp}} = 1.229 \div 1.330$. Таким образом, по формуле (21) находим:

$$\frac{R_{пр}}{R_0} = (\frac{f_{s2}}{f_{snp}}) \cdot (\frac{b_{Э.С}}{b_{ф}}) = (1.229 \div 1.330) \cdot (\frac{692}{1400}) \approx (0.61 \div 0.66)$$

Как видно из полученного результата отношение $\frac{R_{пр}}{R_0}$ для экзотермических прибылей в два раза меньше, чем для обычных прибылей, что полностью подтверждает факт экономичности экзотермических прибылей в сравнении с атмосферными.

Для сравнения в таблице 2 приведены результаты расчета экзотермических прибылей для отливок типа «Плита» с аналогичными таблице 1 размерами. Расчет выполнен в САПР «Оптимальное питание отливок», базирующейся на методике расчета прибылей Чикунова-Чеботарева.

Таблица 2. Результаты расчета экзотермических прибылей

№	L, мм	W, мм	δ, мм	$\frac{V_{пр}}{V_{отл}}$	$\frac{R_{пр}}{R_{отл}}$	f_{snp}
1	300	300	50	0.144	0.624	0,554
2	300	300	100	0.189	0.580	0,596
3	1000	500	300	0.260	0.532	0,650
4	1000	500	100	0.150	0.700	0,494

Выводы: 1)представлена новая методика определения коэффициента запаса прибылей, 2) проведено сравнение представленной методики с существующими, 3) показана адекватность получаемых по новой методике результатов.

Литература

1.Баландин Г.Ф. Основы теории формирования отливки. В 2-х ч. – Ч.2 – М.: Машиностроение, 1976 – 335 с, с ил.

2. Нехендзи Ю.А. Стальное литье. – М.: Государственное научно-техническое издательство литературы по черной и цветной металлургии, 1948 – 767 с.

3. Галдин Н.М., Чистяков В.В., Шатульский А.А. Литниковые системы и прибыли для фасонных отливок.-М.: Машиностроение, 1992-256 с, с ил.

4. Christoph Beckermann. Yield improvement and defect reduction in steel casting. Final technical report. The university of Iowa.2004