

УДК 621.74.041

П. Б. Калюжный, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: kpb.cmw@ukr.net

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ФОРМОВОЧНОГО МАТЕРИАЛА В КОНТЕЙНЕРЕ

В статье предложен механизм теплообмена отливки с частицами формовочного материала при их аэродинамическом перемещении, согласно которого эти частицы перемещаются в объеме слоя материала и периодически контактируют с поверхностью отливки, забирая тепло от отливки и унося его вглубь слоя. Сформулирована теплофизическая модель контактного теплообмена, предполагающая за время контакта передачу тепла от отливки к частице через площадку контакта и через газовую прослойку.

Ключевые слова: теплообмен, формовочный материал, контактная поверхность, аэродинамическое перемещение, газовая прослойка, температурный напор.

У статті запропоновано механізм теплообміну виливка з частинками формувального матеріалу при його аеродинамічному переміщенні, згідно якого такі частинки переміщуються в об'ємі шару матеріалу і періодично контактують з поверхнею виливка, забираючи тепло від виливка та відносячи його вглиб шару. Сформульовано теплофізичну модель контактного теплообміну, яка передбачає за час контакту передачу тепла від виливка до частинки через площадку контакту і через газовий прошарок.

Ключові слова: теплообмін, формувальний матеріал, контактна поверхня, аеродинамічне переміщення, газовий прошарок, температурний напір.

The article proposes the heat exchange mechanism of casting with molding material particles during their aerodynamic movement. According to this mechanism the molding material particles move in the volume of the molding material layer and periodically contact the casting surface, taking heat from the casting and carrying it deep into the layer. The thermophysical model of contact heat exchange is proposed, which presumes, during the contact, the heat transfer from the casting to the particle through the contact area and through the gas interlayer.

Keywords: heat exchange, molding material, contact surface, aerodynamic movement, gas interlayer, temperature head.

Применение технологии литья по газифицируемым моделям для получения отливок из алюминиевых сплавов в сравнении с литьем в металлические формы (кокили) имеет ряд технико-экономических преимуществ, включая: увеличение выхода годного и коэффициента использования металла; снижение энергоматериальных затрат, трудоемкости, стоимости технологической оснастки и увеличения ее ресурса; исключение применения металлических и песчаных стержней для фор-

мирования внутренних полостей сложных литых изделий, что в конечном итоге ведет к снижению металлоемкости литейной продукции и себестоимости при ее изготовлении в 1,5–2 раза. Вместе с тем, следует отметить, что механические свойства отливок, полученных методом литья по газифицируемым моделям, на 20–30 % ниже аналогичных в отливках, которые изготавливаются в металлических формах.

В целях повышения механических свойств в алюминиевых отливках сложной конфигурации, изготавливаемых с применением литья по газифицируемым моделям, был реализован способ интенсификации теплообмена на границе «металл–форма» путем аэродинамического перемещения формовочного материала (ФМ) в контейнере относительно этой контактной поверхности непосредственно в период затвердевания металла и охлаждения отливки.

Для более эффективного управления затвердеванием сплава и охлаждением отливки возникла необходимость в создании модели теплообмена отливки с частицами ФМ. Целью работы было построение физической и теплофизической модели контактного теплообмена отливки с дисперсными частицами ФМ во время его аэродинамического перемещения в контейнере.

Аэродинамическое перемещение формовочного материала достигается путем продувки слоя частиц восходящим потоком газа (чаще всего воздуха), при этом такой взвешенный слой напоминает кипящую жидкость, поэтому его называют кипящим или псевдооживленным слоем. Теплообмен в псевдооживленном слое разделяют на внутренний и внешний. Внутренним называют теплообмен между частицами и охлаждающим газом. Считается, что возрастание теплообмена между газом и частицами при переходе их из неподвижного состояния в псевдооживленное происходит за счет увеличения поверхности контакта фаз. Внешним принято называть теплообмен между поверхностью (телом, погруженным в слой, стенками аппарата) и псевдооживленным слоем. Именно внешний теплообмен, с точки зрения управления процессом теплообмена отливки и формовочного материала, представляет для нас интерес.

Много исследователей, пытаясь отобразить суть процесса теплопередачи от поверхности к псевдооживленному слою, предлагали различные модели внешнего теплообмена и расчетные уравнения для коэффициента теплообмена. Но ввиду большого количества переменных и сложности их влияния на теплообмен предложенные эмпирические формулы справедливы лишь в условиях, ограниченных условиями эксперимента. Суждение о том, что при теплообмене слоя с поверхностью тела значительную часть тепла забирает газ, является неверным, поскольку при обтекании твердого тела псевдооживленным слоем частиц интенсивность теплообмена во много раз больше, чем при теплообмене тела с чистым потоком воздуха. Это говорит об особом механизме теплообмена в псевдооживленном слое, вызванным наличием частиц, которые перемещаются в слое под действием аэродинамических сил.

Результаты исследований и проведенный литературный обзор дали возможность представить физическую модель контактного теплообмена отливки с дисперсными частицами ФМ во время его аэродинамического перемещения следующим образом. Под действием аэродинамических сил, создаваемых восходящим потоком воздуха, частицы двигаются вверх контейнера. В верхней части контейнера из-за его расширения скорость потока воздуха уменьшается, поэтому под действием силы тяжести частицы начинают падать вниз. Также во время движения вверх или вниз частицы соударяются друг с другом, в результате чего изменяется направление их движения. Изменение траекторий движения частиц и, в общем, перемешивание ФМ происходит также из-за пузырьков, которые образуются возле газораспределительной решетки и поднимаются вверх.

В некоторый момент времени ($\tau = 0$) к поверхности отливки температурой $T_{\text{отл}}$ подходит частица ФМ с температурой основного объема слоя $T_{\text{сл}}$ (рис. 1). Во время взаимодействия с поверхностью отливки в течение времени контакта τ_k частица получает определенное количество тепла Q_1 . Покинув поверхность отливки, нагретая частица движется в глубину слоя, а на ее место попадает

другая холодная частица из объема формы.

Описанный механизм объясняет «пульсационный» характер температурных кривых, представленных в работе [1]. Свидетельствуют о правильности приведенного механизма данные работы [2], в которой приводятся результаты исследований мгновенного значения коэффициента теплообмена на контактной поверхности. Полученная осциллограмма изменения коэффициента теплоотдачи имела пульсационный характер, который объясняется тем, что при касании холодной частицы к

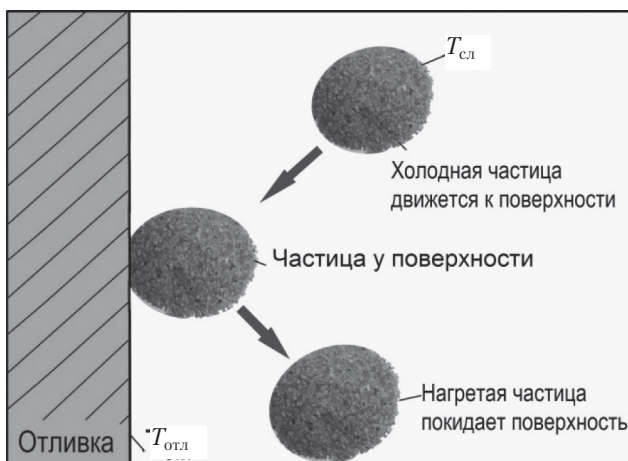


Рис. 1. Схема движения частиц возле поверхности отливки

поверхности теплоотдача является максимальной, а по мере прогрева частицы, ввиду снижения температурного напора, происходит уменьшение теплоотдачи.

Теплофизическая модель процесса переноса теплоты от отливки к частицам ФМ во время его аэродинамического перемещения основывается на описанном выше механизме. В основу положена идея аддитивности общего теплового потока, передаваемого от отливки к слою ФМ. Ввиду того, что порозность псевдооживленного слоя $\geq 0,5$, то считали, что частички, которые непосредственно прилегают в отливке, контактируют только с поверхностью отливки, а контактом друг с другом пренебрегали. Интенсивность отдачи тепла от поверхности отливки к частицам ФМ в первую очередь определяется частотой смены частиц у поверхности отливки, а способ генерации движения с точки зрения теплопереноса играет второстепенную роль [3]. Теплообмен между поверхностью отливки и частицей осуществляется одновременно теплопроводностью и конвекцией. Передачу тепла излучением не учитывали, поскольку температура затвердевания алюминиевых сплавов не превышает 600 °С.

Рассмотрим процесс теплопередачи от поверхности отливки к одиночной частице, которая на протяжении времени τ_k контактирует с поверхностью отливки (рис. 2). Теплота Q_1 , которую частица забирает от поверхности отливки, состоит из теплоты Q_k , которая передается через площадку контакта, и теплоты $Q_{пр}$, которая переносится через газовую прослойку:

$$Q_1 = Q_k + Q_{пр}. \quad (1)$$

Считали, что при касании частица имеет идеальный тепловой контакт с поверхностью отливки. Поскольку радиус частицы намного больше среднего радиуса площадки контакта, а время τ_k меньше времени тепловой релаксации частицы, то контактирующие тела считали бесконечно протяженными в направлении теплового потока [3]. Задачу можно считать одномерной,

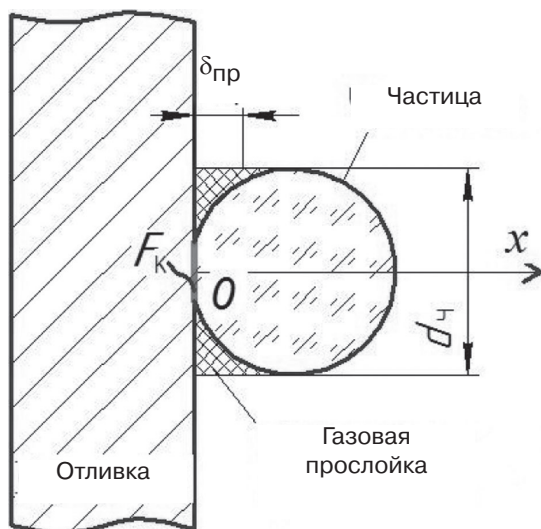


Рис. 2. Схема к расчету теплообмена отливки с частицей ФМ

поскольку тепловой поток в зоне контакта, направленный по нормали к поверхности отливки, намного больше теплового потока, параллельного поверхности.

Определение Q_k сводится к решению уравнений нестационарной теплопроводности двух полуограниченных тел, находящихся в контакте, при граничных условиях 4-го рода [4].

Для частицы имеем:

$$\frac{\partial T_q(x, \tau)}{\partial \tau} = a_q \frac{\partial^2 T_q(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, 0 < x < \infty, \quad (2)$$

где a_q – коэффициент температуропроводности материала частицы, $a_q = \frac{\lambda_q}{c_q \cdot \rho_q}$;

λ_q , c_q , ρ_q – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала частицы.

Принимаем, что температура поверхности частицы $T_q(x, 0)$ в начальный момент равна температуре основного слоя формовочного материала $T_{сл}$.

Граничные условия:

$$T_q(\infty, \tau) = T_{сл}; \quad T_q(0, \tau) = T_{отл}; \quad \text{потоки тепла } -\lambda_{отл} \frac{\partial T_{отл}(0, \tau)}{\partial x} = -\lambda_q \frac{\partial T_q(0, \tau)}{\partial x}.$$

Решение данной задачи с вышеуказанными краевыми условиями имеет следующий вид [4]:

$$\frac{T_q(x, \tau) - T_{сл}}{T_{сл} - T_{отл}} = \frac{K_\beta}{1 + K_\beta} \left(1 + \frac{1}{K_\beta} \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_q \tau}} \right), \quad (3)$$

где K_β – критерий, характеризующий тепловую активность частицы β_q по отношению к тепловой активности отливки $\beta_{отл}$:

$$K_\beta = \frac{\beta_q}{\beta_{отл}} = \sqrt{\frac{\lambda_q c_q \rho_q}{\lambda_{отл} c_{отл} \rho_{отл}}}, \quad (4)$$

где $\lambda_{отл}$, $c_{отл}$, $\rho_{отл}$ – коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность сплава отливки, соответственно.

Плотность кондуктивного теплового потока, передаваемого частице за время τ_k , используя (3) и с учетом (4) нашли по закону Фурье на контактной поверхности ($x = 0$):

$$\begin{aligned} q_k &= -\lambda_q \frac{\partial T_q(x, \tau)}{\partial x} = -\frac{\lambda_q (T_{сл} - T_{отл})}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_q c_q \rho_q}{\lambda_{отл} c_{отл} \rho_{отл}}}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{a_q \tau}} \right) = \\ &= \sqrt{\frac{\lambda_q c_q \rho_q}{\pi \tau}} \cdot \frac{T_{отл} - T_{сл}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_q c_q \rho_q}{\lambda_{отл} c_{отл} \rho_{отл}}}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Среднее за время τ_k количество теплоты Q_k , принимаемое одной частицей через площадку контакта:

$$Q_k = \int_0^{\tau_k} \int_F q_k dF d\tau = 2\sqrt{\frac{\lambda_{\text{ч}} c_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}} \tau_k}{\pi}} F_k \frac{T_{\text{отл}} - T_{\text{сл}}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_{\text{ч}} c_{\text{ч}} \rho_{\text{ч}}}{\lambda_{\text{отл}} c_{\text{отл}} \rho_{\text{отл}}}}} . \quad (6)$$

Принимали, что частица формовочного материала имеет форму додекаэдра. Поэтому площадь контакта F_k равна площади правильного пятиугольника и определяется через диаметр описанной сферы, условно равный среднему размеру частицы $d_{\text{ч}}$:

$$F_k = \frac{\sqrt{5}}{4} \sqrt{5 + 2\sqrt{5}} \left[\frac{2d_{\text{ч}}}{\sqrt{3}(1 + \sqrt{5})} \right]^2 \approx 0,22d_{\text{ч}}^2 . \quad (7)$$

Количество теплоты $Q_{\text{пр}}$, передаваемое через газовую прослойку, определяется ее термическим сопротивлением $\delta_{\text{пр}}/\lambda_{\text{пр}}$, где средняя толщина газовой прослойки принимается равной $\delta_{\text{пр}} = d_{\text{ч}}/6$ [5]. Площадь газовой прослойки определяется как разница площадей проекции сферы на поверхность отливки и площадки контакта:

$$F_{\text{пр}} = \frac{\pi d_{\text{ч}}^2}{6} - F_k \approx 0,3d_{\text{ч}}^2 . \quad (8)$$

Допуская квазистационарность процесса теплопроводности через газовую прослойку, граничные условия 4 рода запишем в следующем виде:

$$-\lambda_{\text{отл}} \frac{\partial T_{\text{отл}}(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\delta_{\text{пр}}} (T_{\text{отл}} - T_{\text{сл}}) = -\lambda_{\text{ч}} \frac{\partial T_{\text{ч}}(\delta_{\text{пр}}, \tau)}{\partial x} . \quad (9)$$

Среднее за время τ_k количество теплоты, которое принимается одной частицей через газовую прослойку:

$$Q_{\text{пр}} = \int_0^{\tau_k} \int_F q_{\text{пр}} dF d\tau = \frac{\lambda_{\text{пр}}}{\delta_{\text{пр}}} (T_{\text{отл}} - T_{\text{сл}}) F_{\text{пр}} \tau_k . \quad (10)$$

Общее количество тепла, которое поглощается частицей за время τ_k , определяется по формуле (1) подставлением в него выражения (6) и (10).

Общее количество тепла, поглощаемое всеми частицами за промежуток времени, определяется как произведение выражения (1), численной концентрации частиц у поверхности и частоты их смены у поверхности.

Полученные выражения (6) и (10) показывают, что интенсивность теплообмена отливки со слоем частиц зависит от времени τ_k пребывания частицы у поверхности. Время контакта частицы с поверхностью отливки определяется скоростью потока воздуха: чем выше скорость потока воздуха, тем меньше времени частица будет находиться у поверхности.

Частота смены частиц у поверхности отливки будет определять интенсивность ее охлаждения. Чем дольше частицы будут находиться у поверхности, тем выше будет средняя температура частиц, прилегающих к поверхности отливки, значит, будет меньше температурный напор между поверхностью отливки и частицами ($T_{\text{отл}} - T_{\text{сл}}$), что приведет к уменьшению теплообмена между поверхностью отливки и частицами [5].

В то же время повышение скорости потока воздуха ведет к увеличению порозности слоя, вызывающей падение концентрации частиц у поверхности, что, как следствие, приводит к снижению теплоотдачи от поверхности отливки к частицам формовочного материала. Это объясняет тот факт, что при некотором (оптимальном) значении скорости потока коэффициент теплоотдачи приобретает максимальное значение.

Полученные выражения также демонстрируют качественное влияние размера частиц на интенсивность теплообмена. Поскольку большая часть теплоты передается от поверхности отливки частице через площадку их контакта, то чем больше будет находиться частиц у единицы площади поверхности отливки, тем больше будет общая площадь контактов частиц с поверхностью, соответственно будет интенсивнее теплообмен.

Показателем интенсивности теплообмена отливки и слоя подвижных частиц является коэффициент теплоотдачи α . Поэтому необходимо его определить для прогноза скоростей охлаждения отливок при разработке новых технологических процессов с применением аэродинамического перемещения формовочного материала.

Зная общее количество теплоты Q , которое отдает отливка через поверхность площадью $F_{отл}$ за промежуток времени τ , по закону Ньютона-Рихмана можно рассчитать средний коэффициент теплоотдачи к слою частиц:

$$\alpha = \frac{Q}{(T_{отл} - T_{сл})F_{отл}\tau}. \quad (11)$$

Выводы

- Разработана теплофизическая модель литья по газифицируемым моделям с аэродинамическим перемещением несвязанного дисперсного формовочного материала в контейнере, которая основывается на интенсивности теплообмена от контактной поверхности отливки, связанная с термовременными параметрами смены формовочного материала на контактной поверхности, его дисперсности и теплофизическими характеристиками.

- Приведенная модель правильно качественно определяет влияние физических характеристик частиц и газа, а также режимных параметров на интенсивность теплообмена. Полученные данные расширяют представление о механизме теплообмена отливки с частицами формовочного материала при их аэродинамическом перемещении.



Список литературы

1. Калужный П. Б., Шалевская И. А., Яковышин О. А. Исследование метода управления процессом кристаллизации отливок в вакуумируемых формах // Металл и литье Украины. – 2015. – № 8 (267) – С. 24–28.
2. Баскаков А. П. Скоростной безокислительный нагрев и термическая обработка в кипящем слое. – М.: Металлургия, 1968. – 223 с.
3. Дворецкий С. И., Королев В. Н., Нагорнов С. А., Таров В. П. Техника и технологии псевдооживления: гидродинамика и теплообмен с погруженными телами. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-т, 2005. – 168 с.
4. Лыков А. В. Теплообмен: Справочник. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
5. Забродский С. С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 487 с.



References

1. Kalyuzhnyi, P. B., Shalevskaya, I. A., Yakovyshin, O. A. (2015) Issledovanie metoda upravleniia processom kristallizatsii otlivok v vakuumiruemykh formakh [*Research control method of the castings crystallization process in vacuumized moulds*]. Metal i lite Ukrainy, no. 8 (267), pp. 24–28 [in Russian].
2. Baskakov, A. P. (1968) Skorostnoy bezokislitelnyy nagrev i termicheskaya obrabotka v kipyashchem sloe [*High-speed non-oxidizing heating and heat treatment in fluidized bed*]. Moscow: Metallurgiya, 223 p. [in Russian].
3. Dvoretzkiy, S. I., Korolev, V. N., Nagornov, S. A., Tarov, V. P. (2005) Tekhnika i tekhnologii psevdoozhizheniya: gidrodinamika i teploobmen s pogrzhennymi telami [*Fluidification techniques and technologies: hydrodynamics and heat exchange with immersed bodies*]. Tambov: Tamb. gos. tehn. un-t, 168 p. [in Russian].
4. Lykov, A. V. (1978) Teplomassoobmen: Spravochnik [*Heat and Mass Exchange: A Handbook*]. Moscow: Energiya, 480 p. [in Russian].
5. Zabrodskiy, S. S. (1963) Gidrodinamika i teploobmen v psevdoozhizhenном sloe [*Hydrodynamics and heat exchange in a fluidized bed*]. Moscow: Gosenergoizdat, 487 p. [in Russian].

Поступила 31.07.2017

Вниманию авторов!

Статьи, поступающие в редакцию, должны иметь название статьи, сведения про авторов (ФИО, научная степень, должность, место работы, e-mail), аннотации, ключевые слова на русском, украинском и английском языках, а также список литературы на английском языке, согласно международным требованиям. Объем статьи — не более **10 стр.**, рисунков — не более **5**.

Статьи подаются как на бумажном, так и электронном носителях. Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов — формат **jpeg**. Графические материалы необходимо сохранять в отдельных файлах. Фотографии, рисунки, графики и чертежи должны быть черно-белыми, четкими и контрастными.