

При наличии в конструкции отливки нескольких, существенно отличающихся по площади поперечного сечения элементов, продолжительность заполнения наиболее тонкостенного и протяженного элемента определяется по формулам (7) или (9). При наличии на стенке отливки приливов, бобышек и других горизонтальных ответвлений расчет продолжительности ее заливки следует проводить по формуле (19).

**Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман,
А.А. Горшков, В.В. Карпов**

РАСЧЕТ КИНЕТИКИ ПЛАВЛЕНИЯ ПЕНОПОЛИСТИРОЛОВОЙ МОДЕЛИ В ПРОЦЕССЕ ЗАЛИВКИ ФОРМЫ СПЛАВОМ

Плавление пенополистироловой модели является одним из основных процессов, определяющих технологические параметры получения отливок при литье по пенополистироловым моделям.

Расчетная схема процесса приведена на рис. 1. Поперечное сечение модели разделено на 2 КК вертикальных слоев. Теплопроводность пенополистирола невелика ($\lambda_{\text{п}}=0,035-0,045$ Вт/(м·К)), поэтому тепловым взаимодействием выделенных вертикальных слоев можно пренебречь и рассматривать их прогрев независимо друг от друга.

Нагрев модели осуществляется от зеркала расплава путем конвекции и теплового излучения. В связи с тем, что облучения слоев модели, находящихся на разных расстояниях от ее центра r , происходят под разными углами, коэффициент теплопередачи излучением $\alpha_{\text{изл}}$ будет зависеть от координаты r .

В цилиндрических координатах коэффициент облучения ϕ равен

$$\phi(I) = 0,5 \left(1 - \frac{DS^2 [I] + r^2 - R_0^2}{\sqrt{(DS^2 [I] + r^2 + R^2) - 4DS^2 [I] R^2}} \right), \quad (1)$$

где $DS[I]$ – толщина зазора между расплавом и слоем модели с номером I .

В случае плоского одномерного приближения

$$\phi(I) = \left(\frac{r + R_0}{\sqrt{(R_0 + r)^2 + DS^2 [I]}} + \frac{R_0 - r}{\sqrt{(R_0 - r)^2 + DS^2 [I]}} \right). \quad (2)$$

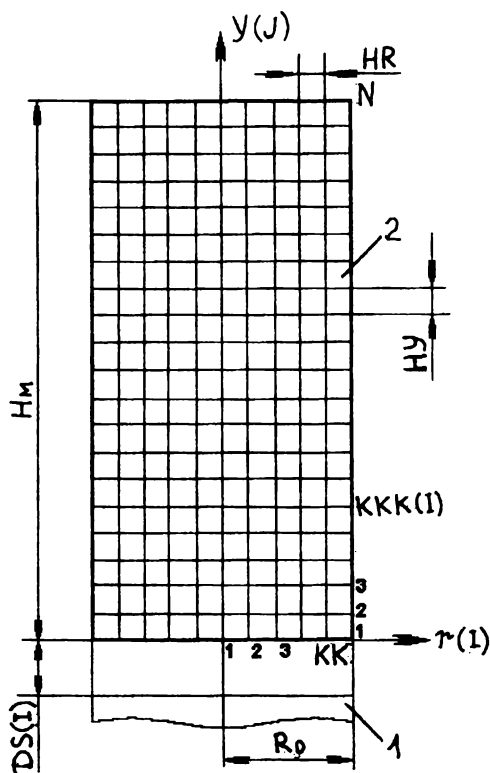


Рис. 1. Расчетная схема:
1 – сплав; 2 – модель

Коэффициент теплопередачи излучением равен

$$\alpha_{\text{изл}}(I) = 5,67 \cdot \varphi(I) \cdot 10^{-8} \cdot \varphi G(I) ((T_S + 273)^2 + (T_n(I) + 273)^2) (T_S + T_n(I) + 546) / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1), \quad (3)$$

- где T_S – температура поверхности расплава, °C;
 $T_n(I)$ – температура нижней поверхности слоя модели с номером I , °C;
 $\varphi G(I)$ – отношение площадей теплоизлучающей поверхности расплава к площади его поперечного сечения S_S ;
 ε_1 и ε_2 – степени черноты поверхности расплава и модели.

Величина $\varphi G(I) = \frac{S_s - S_g}{S_s}$, где S_g – площадь, занятая каплями жидко-

го пенополистирола на поверхности расплава. Коэффициент теплопередачи конвекцией зависит от величины $Ra = Gr \cdot Pr$.

$$R_a = \frac{g D S^3 [I] (T_s - T_n(I)) \cdot 0,71}{273 \nu^2}, \quad (4)$$

где ν – кинематическая вязкость газа в зазоре.

Если $R_a \leq 1700$, $\alpha_{\text{конв}} = \lambda_z / DS[I]$,

где λ_z – теплопроводность газа в зазоре.

Если $1700 < R_a \leq 4000$, $\alpha_{\text{конв}} = (1 + 1,4(1 - 1700/R_a)) \cdot \lambda_z / DS[I]$.

Если $4000 < R_a \leq 10^5$, $\alpha_{\text{конв}} = 0,23 R_a^{1/4} \cdot \lambda_z / DS[I]$.

Если $R_a > 10^5$, $\alpha_{\text{конв}} = 0,085 R_a^{1/3} \cdot \lambda_z / DS[I]$.

Общий коэффициент теплопередачи $\alpha = \alpha_{\text{исп}} + \alpha_{\text{конв}}$.

На первом этапе идет прогрев поверхности модели до температуры плавления пенополистирола $T_{\text{пл}} = 220$ °С. На этом этапе расчет температурного поля по высоте каждого слоя модели выполняется в соответствии с уравнением теплопроводности

$$\frac{\partial T(I, J)}{\partial t} = \alpha_n \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}, \quad 0 < y < H_n; \quad (5)$$

$$T(I, J, t = 0) = T_0 = 20^\circ; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=H_n} = 0; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = -\alpha(I)(T_s - T_n(I)) / \lambda_n,$$

где α_n – температуропроводность пенополистирола.

Для решения данной краевой задачи применяли метод конечных разностей. При выполнении условия $T(I, 1) \geq T_{\text{пл}}$ начинается плавление слоя модели. При плавлении расплавившийся слой удаляется с поверхности модели и в виде капель падает на поверхность расплава. При этом фронт плавления перемещается вверх. Это создает трудности при математическом описании процесса. Обычная конечно-разностная методика неприемлема, так как приводит к дискретному перемещению фронта плавления и большим погрешностям расчета температурного поля в распла-

вившейся части модели. Для обеспечения расчетов плавного перемещения фронта плавления был применен следующий алгоритм.

Пусть в момент времени t номер ближайшего к фронту плавления узла равен $KKK(I)$, а фронт плавления располагается между узлами $KKK(I)+1$ и $KKK(I)$. За время Δt фронт плавления переместится на величину HP . В момент t он располагался на расстоянии ξ от узла $KKK(I)$ (рис. 2).

Изменение теплосодержания слоя в зоне плавления за время Δt равно

$$\Delta H_1 = S(L\rho_n \cdot HP + \frac{c\rho_n(T_m - T^K(KKK(I)+1)HP^2)}{2DY}), \quad (6)$$

где c и ρ_n – теплоемкость и плотность модели;

L – удельная теплота плавления пенополистирола;

S – площадь сечения модели.

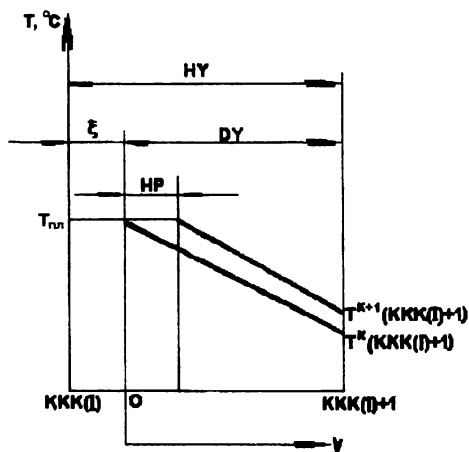


Рис. 2. Схема к расчету перемещения фронта плавления

Изменение теплосодержания твердой части ячейки равно

$$\Delta H_2 = (T^{K+1}(KKK(I)+1) - T^K(KKK(I)+1) + (T_m - T^K(KKK(I)+1)) \cdot HP / DY) \cdot (DY - HP) \cdot c\rho_n S / 2. \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) верхний индекс K относится к $t=t$, а индекс $K+1$ – к $t>t + \Delta t$. Общее изменение теплосодержания $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$.

Уравнение теплового баланса имеет вид

$$\alpha(T_s - T_m)S \cdot \Delta t = \Delta H - \lambda_n (\partial T / \partial y)_{y=DY} \cdot S \cdot \Delta t. \quad (8)$$

Приняв

$$(\partial T / \partial y)_{y=DY} = (4T^K (KKK(I) + 2) - 3T^K (KKK(I) + 1) - T^K (KKK(I) + 3)) / (2HY)$$

и разрешив уравнение относительно величины HP , находим выражение для расчета перемещения фронта плавления

$$\begin{aligned} HP = & ((\alpha(T_s - T_m) + \lambda(\partial T / \partial y)_{y=DY}) \Delta t - c \rho_n (T^{K+1} (KKK(I) + 1) - \\ & - T^K (KKK(I) + 1)) DY / 2 + \lambda(\partial T / \partial y)_{y=DY} \cdot \Delta t) / (L \rho_n + (T_m - \\ & - T^K (KKK(I) + 1)) c \rho_n / 2 - (T^{K+1} (KKK(I) + 1) - T^K (KKK(I) + 1)) c \rho_n / 2). \end{aligned} \quad (9)$$

Для расчета температур в узлах $(KKK(I)+2)+N$ справедливо уравнение (5), а для расчета температуры в ближайшем к фронту плавления узле – конечно-разностное уравнение:

$$\begin{aligned} T^{K+1} (KKK(I)+1) = & T^K (KKK(I)+1) \left(1 - \frac{2a_n \cdot \Delta t}{(HY+DY)HY} - \frac{2a_n \cdot \Delta t}{(HY+D)DY} \right) + \\ & + T^K (KKK(I)+2) \frac{2a_n \Delta t}{HY(HY + DY)} + T_m \frac{2a_n \Delta t}{DY(DY + HY)}. \end{aligned} \quad (10)$$

В процессе плавления расстояние от нижнего края ячейки до фронта плавления увеличивается, а величина $DY = HY - \xi$ уменьшается. Исходя из устойчивости расчета плавление в пределах ячейки рассматриваем до тех пор, пока величина DY не станет меньше $2\sqrt{a_n \cdot \Delta t}$. Далее принимаем, что фронт плавления переносится в следующий узел, т.е. $KKK(I)$ увеличивается на единицу. При этом принимаем $\xi=0$, а $DY=HY$. Расчет величины $\varphi G(I)$ осуществляется с учетом кинетики плавления и испарения пенополистирола.

$$\varphi G = 1 - \frac{S_k}{S} = 1 - \frac{VG(t + \Delta t) \rho_n}{S \rho_x \cdot dK}, \quad (11)$$

где ρ_x – плотность жидкого пенополистирола;

dK – диаметр капли пенополистирола, $dK=1$ мм;

$VG(t+\Delta t)$ – объем жидких капель пенополистирола на зеркале расплава к моменту $t+\Delta t$.

$$VG(t + \Delta t) = (VG(t) + S \cdot HP) \exp(-m_n \cdot \Delta t). \quad (12)$$

где $VG(t)$ – объем жидких капель в предыдущий момент времени;

m_n – кинетический коэффициент испарения, $m_n=0,232+0,00088(t_s-400)$.

На рис. 3 и 4 приведены расчетные данные по кинетике плавления пенополистироловой модели при некоторых условиях. В расчетах приняты следующие значения теплофизических параметров: $\rho_n=28$ кг/м³; $\rho_{жс}=1000$ кг/м³; $\lambda_n=0,04$ Вт/(м·К); $c=1250$ Дж/(кг·К); $L=100000$ Дж/кг; $\lambda_r=0,16$ Вт/(м·К).

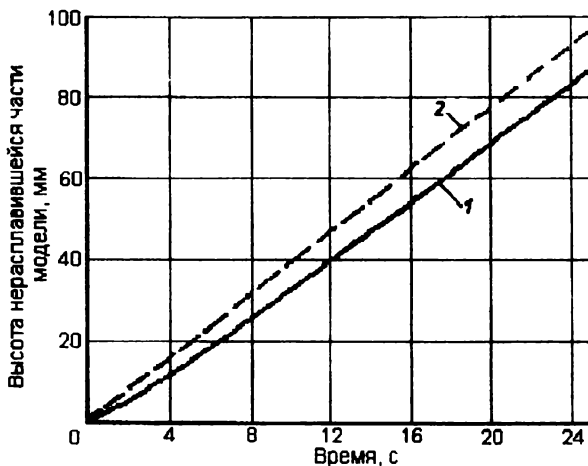


Рис. 3. Кинетика плавления модели при $T_s=750$ °С, $DS=10$ мм:
1 – наружный слой модели; 2 – центр модели

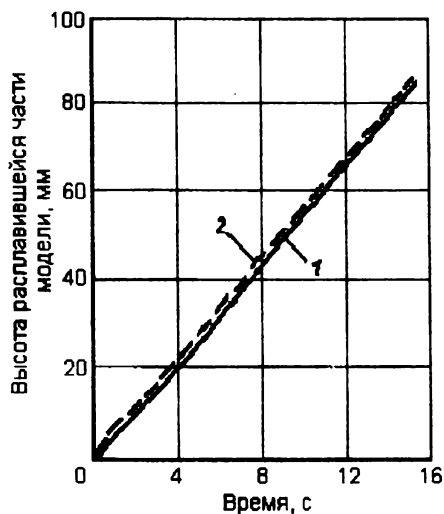


Рис. 4. Кинетика плавления модели при $T_s=750\text{ }^\circ\text{C}$, $DS=3\text{ мм}$:
1 – поверхность модели; 2 – центр модели

**Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман,
А.А. Горшков, В.В. Карпов,
Е.А. Шука**

КИНЕТИКА ЗАПОЛНЕНИЯ МЕТАЛЛОПРОВОДА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК ВАКУУМНЫМ ВСАСЫВАНИЕМ ПО ПЕНОПОЛИСТИРОЛОВЫМ МОДЕЛЯМ*

Заполнение металлопровода является первой стадией заливки формы при литье вакуумным всасыванием. При этом в нижней части полости формы оформляется зазор толщиной d_z (рис. 1).

В начале процесса давление воздуха в вакуумной камере P_x и в зазоре с металлопроводом P_ϕ равно атмосферному P_a . В дальнейшем давление в вакуумной камере уменьшается из-за истечения воздуха в ресивер через установленную в вакуумпровод диафрагму. Давление P_ϕ при этом уменьшается за счет фильтрации воздуха через стенку песчаной формы в вакуумную камеру.

* Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации в форме гранта.