

СВЯЗЬ ПРОЦЕССА ЗАТВЕРДЕВАНИЯ С ОБРАЗОВАНИЕМ ГАЗОВОЙ ПОРИСТОСТИ В ОТЛИВКАХ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

А.И. Головичёв, О.А. Волков

В лабораторных и производственных условиях исследовали влияние теплоаккумулирующей способности материала формы (B_f), толщины стенки отливки (X_i) и температуры заливки ($T_{зал}$) на образование ситовидной пористости в отливках из стали 20-25 Л.

Принятая методика обеспечила содержание водорода в жидкой стали в пределах 3-5 см³/100 г и кислорода 0,001-0,008%. Газовую пористость оценивали по площади (A в %), занятой порами на макрошлифе отливки.

Влияние толщины стенки отливки на показатель газовой пористости (A_i) определяли при $T_{зал} = 1853 \pm 10$ К и установили, что

$$A_1 = -3,022 + 1,25X_i - 0,26X_i^2 \quad (1)$$

и максимальное количество газовых пор имеет место при $X_i = 30$ мм, а минимальное при $X_i = 10$ мм и 40 мм и более.

При $T_{зал} = 1893 \pm 10$ К

$$A_2 = -4,9 + 0,96X_i - 0,016X_i^2 \quad (2)$$

и максимальное количество газовых пор при $X_i = 20$ мм.

Влияние $T_{зал}$ стали на показатель изучаемого дефекта определяли при $X_i = 30$ мм и установили, что

$$A_3 = 6254,9 - 91 T_{зал} + 0,0025 T_{зал}^2 \quad (3)$$

Причём, A_3 имеет минимальное значение при $T_{зал} = 1853 \pm 10$ К.

Если теплоаккумулирующая способность материала разовой формы возрастает, то количество газовых пор в отливках при $X_i = 30$ мм уменьшается согласно выражению (4)

$$A_4 = 40,46 \cdot 10^{-3,5} \cdot 10^{-4} B_f \quad (4)$$

Зависимости $A_1 - A_4$ показали, что благоприятные условия для возникновения газовой пористости в отливках наблюдаются при определённых параметрах процесса кристаллизации стали. В первом приближении за такой параметр можно принять время пребывания в жидком и в жидко-твёрдом состоянии слоя отливки, в котором образуется газовая пора. Такой слой отстоит от поверхности отливки на 1,5-2 мм.

В связи с трудностями экспериментального определения продолжительности пребывания подкоркового слоя отливки в жидком и жидко-твёрдом состоянии исследование проведено на математической модели с использованием явной однородной схемы метода конечных разностей. Соответствующий алгоритм реализует следующую разностную краевую задачу:

$$H_{i,k+1} = H_{i,k} + A[\lambda_1(T_{i-1} - T_i)_k - \lambda_2(T_i - T_{i+1})_k];$$

$$1 < i < N; \quad k > 0; \quad A = \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2}; \quad \Delta t \cdot k = t; \quad \Delta x \cdot i = x;$$

$$T_{i,k} = \left(\frac{H}{c_\phi \cdot \zeta_\phi} \right)_{i,k}; \quad 1 < i < M;$$

$$T_{i,k} = \left(\frac{H}{c_T \cdot \zeta_T} \right)_{i,k}; \quad M \leq i < N;$$

$$H_{i,k} \leq H_{сол}; \quad T_{i,k} = \left(\frac{H}{c_{жс} \cdot \zeta_{жс}} \right)_{i,k};$$

$$M \leq i < N; \quad H_{i,k} > H_{лик}$$

$$T_{i,k} = T_{сол} + (T_{лик} - T_{сол}) \cdot (H_{i,k} - H_{сол}) \cdot \frac{1}{L \cdot \zeta_{ТЖ}};$$

$$M \leq i < N.$$

$$H_{сол} < H_{i,k} < H_{лик}; \quad T_{i,k} = T_{2,k}; \quad T_{N,k} = T_{N-1,k};$$

$$T_{(1 \leq i < M),k} = 293 \text{ К};$$

$$T_{(M \leq i \leq N),0} = T_{зал,k}; \quad H_{(1 \leq i < M),0} = c_\phi \cdot \zeta_\phi \cdot 293 \text{ К};$$

$$H_{(1 \leq i < M),0} = c_T \cdot \zeta_T \cdot T_{сол} + L \cdot \zeta_{ТЖ} + c_{жс} \cdot \zeta_{жс} (T_{зал} - T_{лик});$$

где H – теплосодержание, Дж; Δt – временный интервал, с,

Δx – величина шага сетки по оси X , м; k – номер временного интервала; i – номер узла сетки; $T_{лик}$, $T_{сол}$, $T_{зал}$ – температура ликвидуса, солидуса, и заливки стали, соответственно; M – номер узла сетки на границе металл-форма, N – номер граничного узла сетки.

$$\lambda_1 = \left(2 \frac{\lambda_{i-1} \cdot \lambda_i}{\lambda_{i-1} + \lambda_i} \right)_k; \quad \lambda_2 = \left(2 \frac{\lambda_{i+1} \cdot \lambda_i}{\lambda_{i+1} + \lambda_i} \right)_k;$$

λ_1 , λ_2 – коэффициент теплопроводности соответственно вперёд и назад;

$\lambda(1 \leq i \leq M) = \lambda_\phi$ – коэффициент теплопроводности формы;

$\lambda(M \leq i \leq N) = \lambda_M$ – коэффициент теплопроводности металла;

ζ_ϕ , c_ϕ , $\zeta_{жс}$, ζ_T , c_T , $\zeta_{жс}$ – плотность и теплоёмкость формы, твёрдого и жидкого металла, соответственно;

$\zeta_{ТЖ} = 1/2(\zeta_T + \zeta_{жс})$ – плотность твёрдо-жидкой стали;

L – теплота кристаллизации стали.

Для расчётов были приняты следующие значения параметров модели:

$$\zeta_T = 7500 \text{ кг/м}^3, \quad \zeta_{жс} = 7000 \text{ кг/м}^3, \quad c_T = 753 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$c_{жс} = 920 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$\lambda_M = 39 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}, \quad \lambda_\phi = 1,12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\lambda_{\text{фт}}=0,5\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$$

$$T_{\text{сол}}=1733\text{К},$$

$$T_{\text{лик}}=1773\text{К}, T_{\text{зал}}=1923, 1893, 1853, 1823\text{К}$$

$$L = 264 \text{ КДж/кг}, N = 100, M=50, A=4$$

$$B_{\text{ф}} = (1000, 1500, 2000, 2500)\text{Вт}\cdot\text{сек}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$$

Расчёт распределения температуры по сечению затвердевающей отливки позволил установить, что благоприятные условия для образования наибольшего количества ситовидных пор в отливках имеют место при сохранении температуры в точке $X=1,5\ldots 2$ мм выше значения $T_{\text{лик}}$ в течении 8 с и более. Благоприятные условия характерны для случая, когда сталь заливает при температуре выше 1893 К, (3) и при получении отливок в формах из смесей с $B_{\text{ф}}=1200\text{--}1000 \text{ Вт}\cdot\text{сек}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ при $T_{\text{зал}}=1853^\circ\text{К}$ (4).

Расчёт показал, что газовые поры не возникнут, когда температура в исследуемой точке X поднимается выше значения $T_{\text{лик}}$ на $293\text{--}300^\circ\text{К}$ и через 8 сек. снижается до $T_{\text{сол}}$, например для отливок толщиной 30 мм (1) и при $T_{\text{зал}}=1853^\circ\text{К}$ (3), а также при $v_2=1800 \text{ Вт}\cdot\text{сек}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ (4).

Проверку расчётных значений осуществляли методами термического анализа и выливания.

Установлено влияние $T_{\text{зал}}=1893\text{К}$ и 1833К на изменение температуры в точке, отстоящей на $1,5\ldots 2$ мм от поверхности отливки $X_1=30$ мм и $B_{\text{ф}}=1700\text{--}1800 \text{ Вт}\cdot\text{сек}^{1/2}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Толщина оболочек, полученных методом выливания, хорошо согласуется с результатами расчёта, при (3...4) с выдержки расплава в литейной форме $\zeta=(1,0\ldots 1,5)\text{мм}$, а при (5...6) с $\zeta=(5\ldots 6)\text{мм}$ (рис.2)

Изменение температуры в контрольной точке, определено экспериментально, совпадает с расчётными заданиями.

Расположение кривой (Рисунок 1) показало, что температура в контрольной точке установки термопары в течение 12 с превышали значение $T_{\text{лик}}$, и в отливке обнаружили

пористость, а в случае изменения температуры по кривой 2 поверхность отсутствовала.

Таким образом, для предотвращения образования этого дефекта в отливках имеющих разную толщину стенки с учётом марки стали рекомендуются оптимальные температуры заливаемого металла указанные в таблице 1.

Таблица 1.

Марка стали (ГОСТ 997-88)	Преоблад. толщина стенки отливки, мм	Температура заливки, $^\circ\text{C}$	
		Нижний предел	Верхний предел
20-25Л	20-30	1560	1590
	40-60	1550	1580
	60-100	1540	1560
30-35Л	20-30	1550	1580
	40-60	1540	1560
	60-100	1530	1550
40-45Л	20-30	1540	1560
	30-60	1530	1550
	60-100	1520	1540

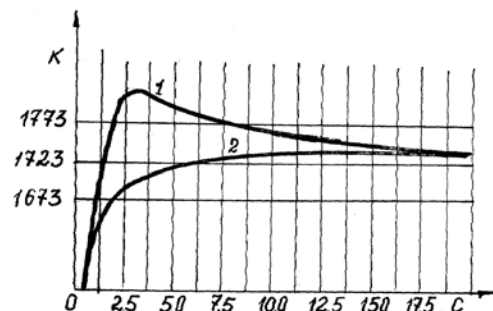


Рисунок 1 – Изменение температуры сплава затвердевающей отливки толщиной 30 мм в точке удалённой на $1,5\text{--}2$ мм от поверхности отливки при $T_{\text{зал}}=1893\text{К}$ (1) и 1833К . (2)



Рисунок 2 - Твёрдая корочка после выливания жидкого остатка из отливки 0,030 м через 3-4 сек., толщина 1-1,5 мм (а) и через 5-6 сек., толщина 2-3 мм (б); $T_{\text{зал}}=1873\text{К}$.