

была 68,5%; доля прогнозов оптимальной средней скорости подъема уровня сплава в форме с ошибкой не более 20% составляла 25%; доля прогнозов названного параметра с высокой и сверхвысокой ошибкой от 60 до 800% составила 37,5%;

по методу Г.М. Дубицкого средняя ошибка прогноза оптимальной средней скорости подъема уровня сплава в форме по всем 40 отливкам составляла 30%; доля прогнозов этого параметра с ошибкой не более 20% была 50%; доля прогнозов названного параметра с высокими и сверхвысокими ошибками от 60 до 200% составила 37,5%.

Из сравнения полученных показателей для каждого из рассматриваемых методов можно сделать вывод: методика Г.М. Дубицкого позволяет существенно точнее прогнозировать величину оптимальной средней скорости подъема уровня сплава в литейной форме по сравнению с методиками С.В. Руссияна и Н.М. Галдина.

А.Б. Чуркин, Б.С. Чуркин
УГПУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ КОКИЛЬНЫХ ОТЛИВОК В УСЛОВИЯХ СТАТИСТИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Математическую модель затвердевания отливок можно неявно записать в виде краевой задачи теплообмена в системе "отливка-форма-окружающая среда". Для тел классических конфигураций данная краевая задача сводится к следующей системе уравнений:

$$\frac{dH_1}{d\eta} = \frac{d^2U_1}{d\Psi^2} + \frac{K}{\Psi} \cdot \frac{dU_1}{d\Psi}, \quad 0 < \Psi < \frac{1}{2}; \quad (1)$$

$$\frac{dH_2}{d\eta} = \frac{d^2U_2}{d\Psi^2} + \frac{K}{\Psi} \cdot \frac{dU_2}{d\Psi}, \quad \frac{1}{2} < \Psi < \frac{1}{2} + \frac{\delta}{2R}; \quad (2)$$

$$\left(\frac{dU_1}{d\Psi}\right)_{\Psi=0} = 0 \quad (3); \quad \left(\frac{U_1}{d\Psi}\right)_{\Psi=0,5} = -2R\alpha_1 \left(T_1 \left(\Psi = \frac{1}{2} \right) - T_2 \left(\Psi = \frac{1}{2} \right) \right); \quad (4)$$

$$\left(\frac{dU_2}{d\Psi} \right)_{\Psi=0,5} = -2\alpha R \left(T_1 \left(\Psi = \frac{1}{2} \right) - T_2(\Psi=0) \right); \quad (5)$$

$$\left(\frac{dU_2}{d\Psi} \right)_{\Psi=0,5+\frac{\delta_\Phi}{2R}} = -2\alpha R P \left(T_2 \left(\Psi = \frac{1}{2} + \frac{\delta_\Phi}{2R} \right) - T_{\text{ВН}} \right); \quad (6)$$

$$H_1 = \int_{T_0}^{T_1} C_1(T) \cdot \rho_1(T) dT \quad (7); \quad U_1 = \int_{T_0}^{T_1} \lambda_1(T) dT; \quad (8)$$

$$H_2 = \int_{T_0}^{T_1} C_2(T) \cdot \rho_2(T) dT \quad (9); \quad U_2 = \int_{T_0}^{T_2} \lambda_2(T) dT; \quad (10)$$

$$\eta = \frac{T_0}{t/(4R^2)}; \quad \Psi = r/2R; \quad (11)$$

$$T_1(\eta=0) = T_{10} \quad (12); \quad T_2(\eta=0) = T_{20}, \quad (13)$$

где $T_1(\Psi, \eta)$ и $T_2(\Psi, \eta)$ - соответственно температуры отливки и формы;
 $C_1(T)$, $\rho_1(T)$, $\lambda_1(T)$ - удельная эффективная теплоемкость сплава,
его плотность и теплопроводность как функции температуры;

$C_2(T)$, $\rho_2(T)$, $\lambda_2(T)$ - удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность материала формы;

K - коэффициент, зависящий от конфигурации отливки (для плоской плиты $K=0$, для шара $K=2$ и для цилиндра $K=1$);

α_1 - коэффициент теплопередачи на границе "отливка-форма";

α_2 - коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности формы;

R - половина толщины стенки, или радиус отливки;

P - коэффициент, равный отношению площади $S_{\text{Фр}}$ охлаждения стенки формы с учетом ее оребрения к площади наружной поверхности формы без учета ребер или штырей, $P=S_{\text{Фр}}/S_\Phi$;

$T_{\text{ВН}}$ - температура окружающей среды;

T_{10} и T_{20} - температура сплава непосредственно после его заливки в форму и температура стенки формы в начале затвердевания очередной отливки.

Анализ системы (1)-(13) показывает, что ее решения являются

функцией переменных Ψ и η , а также параметров $2\alpha_2 R$, P , $\delta_{\Phi}/2R$, T_{10} , T_{20} , $T_{ВН}$, $\lambda_2(T)$, $C_2(T)$, $\rho_2(T)$, $C_1(T)$, $\rho_1(T)$, $\lambda_1(T)$.

Система (1)-(13) определяет первый этап теплового цикла кокиля. После затвердевания и выдержки отливки в форме в течение времени t_1 отливка извлекается из формы, и полуформы разводятся. Далее происходит естественное охлаждение стенок формы на воздухе в течение времени $t_{вд}$, определяемого принятым темпом работы кокильной машины. Затем полуформы смыкаются и начинается новый цикл.

Математическая модель второго этапа описывается следующей системой уравнений:

$$dT_{20}/d\eta = \alpha_2(d^2T_2/d\Psi^2 + K/\Psi \cdot dT_2/d\Psi); \quad (14)$$

$$(dT_2/d\Psi)_{\Psi=0,5+\delta_{\Phi}/2R} = - \frac{2\alpha_2 PR}{\lambda_2} (T_2(\Psi=0,5 + \delta_{\Phi}/2R) - T_{ВН}); \quad (15)$$

$$(dT_2/d\Psi)_{\Psi=0,5} = \frac{2\alpha_2 R}{\lambda_2} (T_2(\Psi=1/2) - T_{ВН}); \quad (16)$$

$$\alpha_2 = 1/(\delta_{кр}/\lambda_{кр} + 1/\alpha_2), \quad (17)$$

где $\lambda_{кр}$ - коэффициент теплопроводности кокильной краски.

Начальная температура кокиля при затвердевании следующей отливки $T_{20}=T_2(\eta=\eta_{вд})$, где $T_2(\eta=\eta_{вд})$ - усредненная температура стенки кокиля в конце второго этапа, т.е. при $\eta=\eta_{вд}=t_{вд}/4R^2$. Очевидно, что при последовательном изготовлении в кокиле серии отливок определяющая кинетику затвердевания температура T_{20} в зависимости от тепловых и геометрических параметров, а также темпа работы кокильной машины будет в тех или иных пределах изменяться.

С помощью специальных экспериментов, выполненных в условиях литейного цеха, было установлено, что колебания T_{20} относительно рекомендованных значений могут достигать 50-200 °С. Это обуславливает соответствующую нестабильность условий формирования отливки, продолжительности ее затвердевания, структуры и механических свойств.

Важнейшим из указанных выше параметров, определяющих процесс, является фактор $TK = 2\alpha_1 R$, где $\alpha_1 = 1/(\delta_{кр}/\lambda_{кр} + \delta_{газ}/\lambda_{газ})$; $\delta_{газ}$ - толщина газового зазора между отливкой и формой; $\lambda_{газ}$ - теплопроводность газа в зазоре; $\delta_{кр}$ и $\lambda_{кр}$ - толщина и теплопроводность кокильного покрытия.

Как показали выполненные эксперименты, толщина газового зазора существенно зависит от перепада давлений ΔP , прилагаемых к расплаву при затвердевании отливок. При $\Delta P > 29$ КПа влиянием газового зазора на кинетику затвердевания можно пренебречь и принять $\alpha_1 = \lambda_{кр} / \delta_{кр}$, а $TK = 2\lambda_{кр}R / \delta_{кр}$. Эти условия соблюдаются при всех разновидностях литья под регулируемым давлением.

Однако и в этом случае обеспечить строгую воспроизводимость коэффициента TK невозможно, так как существующие методы нанесения кокильного покрытия не позволяют достаточно точно обеспечить заданную толщину слоя краски, а в процессе работы кокиля он изнашивается. Это обуславливает случайный характер изменения $\delta_{кр}$, а следовательно, и TK в процессе изготовления отливок.

Выполненный в условиях литейного цеха ПО "Уралтрансаш" анализ изменения $\delta_{кр}$ на ряде отливок в процессе работы кокилей в течение смены показал, что $\delta_{кр}$ изменяется как нормально распределенная случайная величина при среднеквадратичном отклонении $\sigma(\delta_{кр})$ в пределах 0,02-0,1 мм.

Суммируя сказанное, можно заключить, что рассматриваемая тепловая система является детерминированной по своей природе, но характеризуется наличием случайных входных параметров, главными из которых являются T_{20} , TK и T_{10} . В соответствии с этим и основные выходные величины, важнейшей из них является величина $\tau_{затв} = t_{затв} / 4R^2$, будут случайными. При этом решение системы (1)-(13) при заданных фиксированных значениях входных параметров может быть адекватно полученным на практике результатам лишь случайно. Этим во многом объясняется скептическое отношение производителей к расчетным методам теории затвердевания.

Сущность статистического моделирования затвердевания отливок сводится к решению краевой задачи (1)-(13) на ЭВМ, при котором значения величин T_{10} , T_{20} и $\delta_{кр}$ вводятся с помощью генератора случайных нормально распределенных чисел с заданными значениями их математических ожиданий M и среднеквадратичных отклонений σ . При каждом наборе значений входных параметров ($DF = \delta_{кр} / 2R$, P , R и характеристик $M_{T_{10}}$, $M_{T_{20}}$, $M(\delta_{кр})$, $\sigma_{T_{10}}$, $\sigma_{T_{20}}$ и $\sigma(\delta_{кр})$) выполняли $N=10$ расчетов при разных наборах значений T_{10} , T_{20} и $\delta_{кр}$. В качестве выходной величины в расчетах определяли относительную продолжительность затвердевания $\tau_{затв}$.

Целью статистического моделирования являлось определение конк-

ретных регрессионных зависимостей статистических характеристик распределения величины $\tau_{затв}$ от параметров R , M_{T20} , $M(\delta_{кр})$, δ_{T20} , $\delta(\delta_{кр})$.

Расчеты показали, что без дополнительных мероприятий естественный дрейф входных параметров может привести к существенным (90% и более) колебаниям величины $\tau_{затв}$.

Наибольшее влияние на разброс значений $\tau_{затв}$ оказывает начальная температура формы и ее колебания. Поэтому стабилизация теплового режима формы является решающей в деле обеспечения стабильности эксплуатационных свойств получаемых отливок.

А.В. Чуркин, Б.С. Чуркин
УГПУ

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ОТЛИВОК НА ИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

При разработке технологического процесса изготовления отливок из алюминиевых сплавов остается открытым вопрос, из каких соображений и каким образом следует рекомендовать тепловые условия формирования отливки, за какое время $\tau_{затв}$ должна затвердеть данная отливка. Очевидно, что скорость охлаждения сплава и $\tau_{затв}$ при прочих равных условиях определяют механические свойства сплава в отливке, а также их качество. Если для чугуна существуют номограммы, позволяющие связать структуру и механические свойства отливок со скоростью их охлаждения в форме, то для алюминиевых сплавов таких рекомендаций нет.

С целью установления зависимостей δ_B и δ_5 отливок из алюминиевых сплавов от тепловых условий и продолжительности их затвердевания были проведены эксперименты на отливках из сплава АК7 плоской и цилиндрической конфигураций, изготовленных при обычном кокильном литье и вакуумным всасыванием. В экспериментах фиксировали термические кривые охлаждения сплава, по которым определяли продолжительность затвердевания отливки. Из осевых объемов отливки на двух, симметрично расположенных по высоте, ярусах вырезали темплеты для механических испытаний. Все отливки были залиты сплавом одной плавки. Механические испытания отливок проводили после их термической