УДК 621.746.6

И.П.Прокопов, канд.техн.наук

К ПРОЦЕССУ НАГРЕВА УПРОЧНЯЮЩИХ ВОЛОКОН КОМПОЗИЦИОННОЙ ОТЛИВКИ

Процесс теплового взаимодействия составляющих композиционной отливки обычно протекает в условиях понижения температуры расплава матрицы и характеризуется главным образом температурным полем отливки. Рассмотрим основные закономерности изменения температурного поля системы волокна–матричный расплав. При этом будем считать, что распределение температуры по сечению отдельного волокна описывается параболой n–порядка [1], теплофизические коэффициенты компонентов отливки являются постоянными, а процесс нагрева упрочняющих элементов протекает в условиях плотного контакта поверхности волокон с расплавом матрицы, причем теплообмен с наружной стороны композиции отсутствует.

При решении задачи целесообразно расчленить весь процесс на две стадии: первая – фронт прогрева не достиг центров волокон; вторая – температура волокон изменяется по всему их объему.

Дифференциальное уравнение теплового баланса, характеризующее начальную стадию прогрева, имеет вид

$$-dM'_{м}C'_{м}dT'_{м}=n\lambda_{в}dF_{в}N_{в}\,\frac{T'_{м}-T_{o}}{x_{ов}}\,dt\,, \tag{1}$$

где $M'_{м}$ и $C'_{м}$ – масса и удельная теплоемкость матричного расплава композиционной отливки; $T'_{м}$ – температура расплава; $\lambda_{в}$ – коэффициент теплопроводности материала волокон; $F_{в}$ и $x_{ов}$ – площадь поверхности и глубина прогретого слоя волокна; $N_{в}$ – количество волокон в композиции; T_{o} – начальная температура волокон; t – время.

Для решения уравнения (1) из него необходимо исключить одну из переменных. Используя соотношения, полученные в работе [1], находим

$$T'_{м}=T_{o}+\frac{T_{зал}-T_{o}}{1+\frac{2L}{n+1}\left(1-\frac{\delta_{в}}{n+2}\right)\delta_{в}}\,, \tag{2}$$

1*

где $L = \dfrac{V_в a'_м \lambda_в}{(1-v_в) a_в \lambda'_м}$; $v_в$ – относительное объемное содержание волокон в композиционной отливке; $a_в = \lambda_в / C_в \rho_в$ и $a'_м = \lambda'_м / C'_м \rho'_м$ – коэффициенты температуропроводности волокон и матрицы; $\lambda'_м$ и $\rho'_м$ – коэффициент теплопроводности и плотность матричного расплава; $C_в$ и $\rho_в$ – удельная теплоемкость и плотность материала волокон; $\delta_в = x_{ов}/x_в$ – относительная глубина прогретого слоя волокна; $x_в$ – радиус волокна; $T_{зал}$ – температура заливаемого металла.

Подставив соответствующие значения $T'_м$ и $dT'_м$ в уравнение (1) и проинтегрировав его в пределах от t_0 до t и от 0 до $x_{ов}$, получаем зависимость глубины прогрева волокон от времени

$$Fo - Fo_{ов} = \frac{n+2}{4nL}\left\{\left\{\ln\left[1+\frac{2L}{n+1}\left(1-\frac{\delta_в}{n+2}\right)\delta_в\right]+\frac{4\delta_в}{n+2}-\right.\right.$$

$$-\left[1+\frac{2(n+1)}{(n+2)L}\right]^{1/2}\ln\left\{\frac{1+\left[1+\frac{2(n+1)}{(n+2)L}\right]^{1/2}}{1-\left[1+\frac{2(n+1)}{(n+2)L}\right]^{1/2}}\times\right.$$

$$\left.\left.\left.\times\frac{\left(1-\frac{2\delta_в}{n+2}\right)-\left[1+\frac{2(n+1)}{(n+2)L}\right]^{1/2}}{\left(1-\frac{2\delta_в}{n+2}\right)\left[1+\frac{2(n+1)}{(n+2)L}\right]^{1/2}}\right\}\right\}\right\}, \qquad (3)$$

где $Fo = \dfrac{a_в t}{x_в^2}$; $Fo_{ов} = \dfrac{a_в t_о}{x_в^2}$.

Продолжительность прогрева упрочняющих волокон до центра $t_ц$ определяется из (3) при условии $x_{ов} = x_в$.

Начиная с момента $t \geq t_ц$ происходит нагревание всего объема волокон. Дифференциальные уравнения теплового баланса процесса

$$-dM'_м C'_м dT'_м = n\lambda_в dF_в N_в \frac{T'_м - T_ц}{x_в} dt; \qquad (4)$$

$$n\lambda_в dF_в N_в \frac{T'_м - T_ц}{x_в} dt = dM_в C_в N_в \left(dT'_м + \frac{n}{2} dT_ц\right), \qquad (5)$$

где $M_в$ – масса волокна; $T_ц$ – температура центра волокна.

Решение системы уравнений осуществляем с помощью преобразований Лапласа. Выразив (4) – (5) в изображениях и определив оригиналы функций по второй теореме разложения [2], находим зависимости температур расплава матрицы и центров волокон от времени:

$$T'_м = T_o + (T_{зал} - T_o)\left\{\frac{n+2}{n+2(1+L)} e^{-2(n+2)(1+L)(Fo - Fo_ц)} + \frac{1}{1+L}\left[1 + e^{-2(n+2)(1+L)(Fo - Fo_ц)}\right]\right\}; \qquad (6)$$

$$T_ц = T_o + \frac{T_{зал} - T_o}{1+L}\left[1 + e^{-2(n+2)(1+L)(Fo - Fo_ц)}\right], \qquad (7)$$

где $Fo_ц = \frac{a_в t_ц}{x_в^2}$.

Полученные соотношения позволяют определять температурное поле волокнистой композиционной отливки в любой момент времени в течение всего процесса прогрева упрочняющих волокон расплавом матричного материала.

Литература

1. Вейник А.И. Приближенный расчет процессов теплопроводности. М.-Л., 1959. 2. Шостак Р.Я. Операционное исчисление. М., 1972.