

*The analysis of the problem of calculation of metal forms used in casting production is presented. The mathematical instrument and possibilities of use of the computer technologies and modeling of the casting processes in working out the technologies with the use of chill moulds is analyzed.*

А. Н. ЧИЧКО, В. Ф. СОБОЛЕВ, БНТУ,  
Л. В. МАРКОВ, ОАО «ММЗ»

УДК 669.27:519

## О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОВ РАСЧЕТА КОКИЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Литье в кокиль является одним из распространенных специальных видов литья. Экономическая эффективность применения этого метода литья определяется в первую очередь стойкостью металлической формы, в себестоимости отливки она составляет 25–30%. Повышение стойкости кокиля позволяет снизить себестоимость литья и сделать экономически выгодным перевод на кокильное литье большого числа отливок, изготавливаемых в настоящее время другими способами. Высокая стоимость кокилей — один из важнейших факторов, сдерживающих широкое внедрение высокопроизводительного кокильного литья.

Основной причиной выхода из строя металлических форм служит образование трещин на рабочей и наружной поверхности, образование сетки разгара и коробление кокиля. По мнению большинства специалистов, ведущая роль в образовании перечисленных выше явлений принадлежит термомеханическим явлениям. Термонапряженно-деформированное состояние кокиля — основной фактор, определяющий его стойкость [1–3].

Термические напряжения формируются как результат большого температурного градиента, возникающего в стенке кокиля в момент заливки расплава. Работа кокилей происходит в условиях термосиловых циклов, причем основные параметры циклов (температуры, напряжения и деформации) зависят от параметров технологии и конструкции кокиля.

Среди причин, определяющих термостойкость металлической формы, хорошо изучена термостойкость материалов кокиля. Разрушение материала кокиля начинается с зарождения и роста субмикротрещин. Изучению этого сложного явления посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Ряд работ посвящен объяснению процесса трещинообразования с позиций дислокационной теории [4]. Условием зарождения микротрещин является объединение дислокаций под действием напряжений. По мне-

нию большинства исследователей, механизм термоусталостного разрушения материала в результате циклического воздействия температуры и напряжений заключается в следующем. На первой стадии термоусталости происходит возникновение и накопление дефектов кристаллического строения материала, в частности дислокаций, что ведет к некоторому упрочнению с одновременным снижением модуля упругости материала. При продолжении термоциклирования наступает состояние предельной концентрации дефектов, приводящее к появлению трещин в отдельных микрообъемах материала.

Наряду с изучением кинетики и механизма разрушения, проводящимся на уровне субмикроструктуры, достаточно хорошо изучен вопрос по энергетике трещинообразования. Вводят различного рода энергетические характеристики, отражающие поведение материала при деформации в локальных объемах. Для оценки поведения материала, находящегося в поле напряжений, используется удельная минимальная энергия пластической деформации, оцениваемая по площади истинной диаграммы растяжения, ограниченной деформацией и напряжением появления шейки [5].

Дальнейшим развитием этих работ явилась разработка методов относительной пригодности материалов для изготовления кокилей. Для оценки пригодности хрупких материалов, используемых для изготовления кокилей, имеющих теплозащитное покрытие, предложен параметр [2]:

$$z_0 = \frac{\sigma_b \lambda}{\alpha_t E}, \quad (1)$$

где  $\sigma_b$  — предел прочности при растяжении;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\alpha_t$  — коэффициент термического расширения;  $E$  — модуль упругости.

Для пластичных материалов кокиля предлагается [6] следующий параметр:

$$k = \frac{\lambda \delta}{\alpha_t E}, \quad (2)$$

где  $\delta$  — относительное удлинение.

Для оценки стойкости хрупких материалов, в случае если кокиль не имеет теплозащитного покрытия, в работе [7] предлагается использовать соотношение:

$$z_0'' = \frac{\sigma_s}{\alpha_T E}. \quad (3)$$

Для пластичных материалов в этой работе рекомендуется применять следующее соотношение:

$$n = \frac{a_n}{\sigma_T \left( \alpha_T \theta_k - \frac{2\sigma_T}{E} \right)}, \quad (4)$$

где  $a_n$  – ударная вязкость;  $\sigma_T$  – предел текучести;

$$\theta_k = \theta_{\text{зал}} \frac{b_1}{b_1 + b_2}. \quad (5)$$

Здесь  $\theta_{\text{зал}}$  – температура металла в момент заливки, отсчитанная от начальной температуры кокиля как от нуля;  $b_1$  и  $b_2$  – соответственно коэффициенты аккумуляции теплоты материалов отливки и кокиля.

Чем больше значения приведенных выше параметров, тем выше при прочих равных условиях стойкость кокилей.

Получаемые количественные значения параметров с определенной вероятностью могут быть использованы для прогнозирования стойкости кокилей в реальном кокиле. Термостойкость материала кокиля, часто имеющего сложную конфигурацию, значительно отличается от термостойкости отдельно испытанного образца из-за разностенности кокиля. Наличие термических узлов в кокиле резко увеличивает опасность образования трещин и выхода из строя кокиля. Повышение температуры на некотором участке кокиля приводит к снижению предела текучести и локализации деформаций. Все это вызывает необходимость разработки более адекватных методов расчета стойкости кокилей. В строгой математической постановке задача расчета термических напряжений в кокилях с учетом пластической деформации материала рабочей стенки кокиля представляет собой весьма сложную задачу и не решена до сих пор. Поэтому ограничиваются обычно различными приближениями. Наиболее характерны два приближения, состоящие в том, что задача решается в упругой постановке, а конфигурация кокиля приводится к плоской. При этом в расчетах используется приведенная толщина кокиля  $x_2$  [8], определяемая из выражения:

$$x_2 = R_2 = \frac{V_2}{F_1}, \quad (6)$$

где  $V_2$  – объем данного кокиля сложной конфигурации;  $F_1$  – площадь поверхности охлаждения отливки.

В работе [3] для расчета напряжений принимается следующая схема: стенка чугунного кокиля принята в виде плоской плиты, в которой имеется линейное распределение температуры. В момент полного прогрева кокиля максимальные напряжения в его стенках рассчитываются следующим образом: сжимающие (на внутренней поверхности)

$$\sigma = \frac{nE\alpha_T\theta_{1n}}{(1-\nu)(n+1)}, \quad (7)$$

растягивающие (на наружной поверхности)

$$\sigma = \frac{E\alpha_T\theta_{1n}}{(1-\nu)(n+1)}, \quad (8)$$

где  $E$  – модуль упругости для чугуна;  $\alpha_T$  – коэффициент линейного расширения;  $\nu$  – коэффициент Пуассона;  $\theta_{1n}$  – температура рабочей поверхности, отсчитываемая от начальной температуры кокиля как от нуля;  $n$  – показатель параболы, описывающей температурное поле в стенке кокиля. Для практических расчетов рекомендуется принимать  $n=1$ .

В работе [9] плоский кокиль рассматривается как свободно деформируемая конструкция, а закон распределения температуры по сечению стенки аппроксимируется параболой. Формула для расчета напряжений на внутренней поверхности плоской стенки имеет вид

$$\sigma = -\frac{\alpha_T E}{1-\nu} \theta_{1n}, \quad (9)$$

где  $\theta_{1n}$  – температура на внутренней поверхности кокиля, отсчитанная от температуры обрамления как от нуля (минус относится к напряжению сжатия).

Формула для расчета напряжений на внутренней поверхности цилиндрического кокиля имеет сходный по своей структуре вид с поправкой влияния кривизны стенки на характер теплообмена:

$$\sigma = \frac{\alpha_T E}{1-\nu} \lambda_{T_2} \left[ \frac{3+m}{6(1+m)} - 1 \right], \quad (10)$$

где  $\lambda_{T_2}$  – перепад температуры по сечению стенки;  $m = R_2 : R_1$ ;  $R_1$  и  $R_2$  – соответственно внутренний и внешний радиус кокиля.

Наиболее полно задача расчета температурных напряжений в кокиле в зависимости от основных технологических факторов решена в работе [10].

Для плоского кокиля напряжения сжатия, растяжения и изгиба находятся из выражений:

$$\lambda_{\text{сж}} = -\frac{\alpha E}{1-\nu} (T - T_0), \quad (11)$$

$$\sigma_p = \frac{\alpha E}{l(1-\nu)} \int_0^l (T - T_0) dx, \quad (12)$$

$$\sigma_n = \frac{3\alpha E(2x-l)}{l^3(1-\nu)} \int_0^l (2x-l)(T - T_0) dx, \quad (13)$$

где  $T_0$  — средняя начальная температура кокиля;  $x$  — координата, отсчитываемая от внутренней поверхности стенки кокиля;  $l$  — толщина стенки кокиля.

В одномерной постановке также решена задача термомеханического состояния изложницы [11].

Анализ приведенных выше расчетных формул показывает, что все они имеют одинаковую, сходную структуру. Объектом исследования является плоский кокиль. Это вызвано тем, что аналитическое решение задачи о температурном поле даже при простейших граничных условиях отличается сложностью математических выражений. Для упрощения решения задачи о температурном поле кокиля используется подход, предложенный А.И.Вейником и А.М.Петриченко — задается температура среды, окружающая рабочую поверхность кокиля. В качестве такой температуры принимается среднекалориметрическая температура. Температурное поле кокиля  $T = T(x, t)$  определяется путем решения дифференциального уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (14)$$

при следующих граничных и начальных условиях:

$$\left. \begin{aligned} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha_1 (T_k - T) &= 0, & x = 0, \\ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} - \alpha_2 (T_c - T) &= 0, & x = l, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$T(x, 0) = f(x), \quad (16)$$

где  $t$  — время;  $x$  — координата, отсчитываемая от внутренней поверхности кокиля;  $l$  — толщина стенки кокиля;  $a$  — коэффициент теплопроводности материала кокиля;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала кокиля;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — соответственно коэффициент теплоотдачи на внутренней и наружной поверхности кокиля;  $T_k$  и  $T_c$  — температура среды, окружающая внутреннюю и наружную поверхность кокиля соответственно;  $f(x)$  — функция, характеризующая начальное распределение температуры в кокиле.

Современная теория термоупругости позволяет определить температурные напряжения и деформации любого тела, однако для этого необходимо знать его температурное поле [12]. Поэтому проблема расчета температурных напряжений и деформаций кокилей сводится в основном к достоверному определению их температурных полей. Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время не существует метода

точного определения трехмерного поля кокиля с учетом теплоизолирующего покрытия и нестационарности процесса теплообмена между отливкой и формой. Как следствие, не представляется возможным исследовать влияние параметров технологического процесса и конструктивными особенностями кокиля на температурные напряжения и деформации и, в конечном счете, на его стойкость. Следует отметить, что моделирование и расчет напряжений в кокиле должны учитывать не только его нагрев, но и сложный характер движения металла в форме.

Развитие вычислительных методов и компьютерных технологий позволяет предложить новые подходы к решению этой важной для практики задачи. В этом направлении представляет интерес использование клеточно-автоматных подходов для расчета кокилей на основе идей механики сплошных сред [13]. Клеточно-автоматный подход позволяет задавать сложную трехмерную конфигурацию моделируемого объекта, учесть физические характеристики материалов отливки кокиля теплоизолирующего покрытия, моделировать макро- и микропараметры сплошных сред.

### Литература

1. Вейник А.И. Проблема стойкости кокиля // Теплофизика в литейном производстве. Мн.: АН БССР, 1963. С. 5–11.
2. Коцюбинский О.Ю. Температурные напряжения в плоских металлических формах // Литейное производство. 1959. №3. С. 30–34.
3. Петриченко А.М. Теория и технология кокильного литья. Киев: Техника, 1967.
4. Машков А.К. К проблеме кокиля. Омск: Зап.-Сиб. изд-во, 1975.
5. Иванова В.С. Усталостное разрушение металлов. М.: Госиздат, 1963.
6. Храмченков А.И. Исследование теплового режима и стойкости металлических форм: Дис. ... канд. техн. наук. Мн., 1963.
7. Серебро В.С. Расчет температурного поля металлической литейной формы // Изв. вузов. Черная металлургия. 1968. №11. С. 163–167.
8. Вейник А.И. Кокиль. Мн.: Наука и техника, 1972.
9. Серебро В.С. Температурные напряжения в кокилях различной конструкции // Теория и практика производства отливок из черных и цветных сплавов в постоянные формы. М.: НИИМАШ, 1968. С. 40–46.
10. Буткевичус Н.А. Разработка инженерных методов расчета температурных напряжений и деформаций кокилей: Дис. ... д-ра техн. наук. Каунас, 1972.
11. Ротенберг В.А. Разработка ресурсосберегающих процессов при тепловой обработке чугуновых и стальных изделий в металлургических технологиях: Дис. ... канд. техн. наук. Мн., 2000.
12. Боли Б., Уэйнер Д. Теория температурных напряжений / Пер. с англ. М.: Мир, 1964.
13. Чичко А.Н., Дроздов Е.А. Трехмерное математическое моделирование термоупругих характеристик сплава в условиях многократных термических нагреток // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. №2. С. 111–116.