



There is proved the necessity and efficiency of the specialized software development for automatized projection of new foundry technologies in the article.

Е. И. МАРУКОВИЧ, В. А. ПУМПУР, ИТМ НАН Беларуси

УДК 669.18

О СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОМ ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ЛИТЕЙНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Современные системы автоматизированного проектирования литейных технологий (САПР ЛТ) являются, несомненно, основным и мощным инструментом для разработки высоконадежных и качественных литейных процессов. За последние 20 лет в области разработки САПР ЛТ достигнуты огромные успехи. Однако универсальные многопрофильные пакеты имеют, как правило, большую стоимость. Опыт использования создаваемых и модернизируемых САПР ЛТ показал, что они наиболее эффективны для крупносерийного производства отливок [1]. В условиях активного использования персональных компьютеров и преобладающего развития мелкосерийного производства отливок наиболее выгодно создавать специализированные, узкопрофильные программные комплексы, ориентированные на определенные способы литья. Это позволяет, используя типовые модели литейных процессов (теплообмена, гидродинамики, питания отливки и т.д.), наилучшим образом учитывать начальные и граничные условия при моделировании, а также упрощать при необходимости математические модели. В результате можно снизить затраты на разработку программных комплексов и добиться значительного повышения адекватности используемых моделей, осуществив адаптацию программного обеспечения к условиям производства.

Базовой математической моделью, используемой при моделировании процессов литья, является математическая модель нестационарного теплообмена, которая формализуется использованием уравнений теплопроводности для расчетных областей [2]. Кроме того, необходимо смоделировать тепловые процессы, имеющие место при изменении агрегатного состояния сплавов и металлов, а также граничные и начальные условия. Добавление к базовой модели уравнений гидродинамики или, к примеру, уравнений, описывающих термонапряженное состояние формируемой отливки, приводит к значительному усложнению математической модели. Зачастую это усложне-

ние не оправдано, поскольку или не приводит к ожидаемому результату, или и без такого рода усложнения можно достичь поставленных целей моделирования.

Поэтому первым этапом математического моделирования литейных процессов является осмысление целей моделирования и на основании этого выбор вида модели. В данном случае переход “от простого к сложному” вполне оправдан, поскольку моделирование только процессов теплообмена может дать хорошие результаты для дальнейшего анализа и обоснования необходимости усложнения исходной модели.

Как правило, основной целью использования математической модели теплообмена для описания процесса литья является получение информации о динамике затвердевающей части отливки, ее двухфазной зоны, тепловых потоков на границе “отливка–кристаллизатор”, о динамике температур поверхностей и критических точек. По динамике затвердевшей части отливки и ее двухфазной зоны в различных сечениях можно судить об эффективности питания отливки расплавом, о времени полного затвердевания, сделать выводы о необходимости конструктивных изменений литниково-питающей системы, кристаллизатора, системы охлаждения и т.д. Информация о тепловых потоках на контактной границе дает представление о кинетике роста корки в процессе затвердевания металла или сплава на всей поверхности формы. Динамика температур на поверхностях и в критических точках наряду с другими данными может быть полезной информацией для адаптации математической модели теплообмена к реальным условиям.

Программные комплексы для расчетов процессов литья в валковые кристаллизаторы являются характерным примером преимущества разработки специализированных пакетов перед универсальными. Этот вывод основан на опыте разработки пакетов программ, предназначенных для расчета теплообмена при литье в валковый

кристаллизатор биметаллических лент бесслитковой прокаткой [3], армированной хлористомедной ленты [4], при литье лент из цветных металлов в кристаллизатор типа “колесо-лента” [5]. Эти процессы протекают с достаточно высокими скоростями, обеспечивающими значения чисел $Re > 10$. Решение задач теплообмена для указанных процессов осуществляется на основе общего подхода к их постановке: задачи решаются для квазистационарного режима в неподвижной системе координат, т.е. во времени рассматриваются явления лишь в одном сечении, перпендикулярном поверхности валков [3]. Если вдобавок пренебречь теплообменом вдоль поверхности валков, то задача сводится к одномерной.

В результате для процесса бесслитковой прокатки биметалла уравнения в валках и подложке при рассмотрении теплообмена в зонах *A* и *B* (рис. 1) имеют общую форму:

$$\frac{\omega}{a_i} \frac{\partial T_i}{\partial \varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) \quad (i = 2, 3, 4), \quad (1)$$

где ω – угловая скорость валков; $\varphi(\tau)$ – угловая координата; r – радиальная координата; a_i – температуропроводность материалов; T_i – температурные поля расчетных областей.

Уравнение теплопроводности в декартовой системе координат для зоны *B* принимает вид

$$\frac{V}{a_1} \frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + W, \quad (2)$$

где W – тепловыделение за счет пластической деформации в зоне *B*; V – линейная скорость валков; T_1 – температурное поле формирующейся отливки.

При решении уравнения (2) вводили безразмерные координаты для устранения сложностей, связанных с геометрией зоны *B*.

Решение задачи намораживания в зоне *A* проводили с введением эффективной теплоты кристаллизации $L_s = L + c_1(T_z - T_k)$, где L – удельная скрытая теплота кристаллизации; c_1 – удельная теплоемкость расплава; T_z , T_k – температура заливаемого металла и температура его кристаллизации.

В растущей корке принимали линейное распределение температур. Теплообмен между растущей коркой *1* с подложкой *2* и валком *4* осуществляли в соответствии с граничными условиями третьего рода с коэффициентами контактного теплообмена. С учетом допущений процесс затвердевания описывался уравнениями:

$$\lambda_1 \frac{T_k - T_1}{\xi(\varphi)} = \alpha_{2,4} (T_1 - T_{2,4}), \quad (3)$$

$$\lambda_1 \frac{T_k - T_1}{\xi(\varphi)} = \rho_1 \omega L_s \frac{d\xi}{d\varphi}, \quad (4)$$

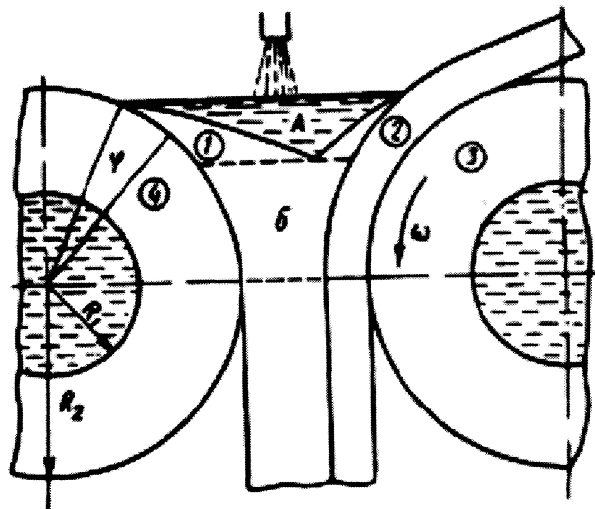


Рис. 1. Схема процесса бесслитковой прокатки биметалла: *A* – зона затвердевания; *B* – зона пластической деформации; *1* – затвердевающий металл; *2* – подложка; *3*, *4* – валки; ω – угловая скорость вращения валков; φ – угловая координата; R_1 – внутренний радиус валка; R_2 – внешний радиус валка

где $\xi(\varphi)$ – толщина корки; ρ_1 – плотность отливки; λ_1 – удельная теплопроводность; $\alpha_{2,4}$ – коэффициенты контактного теплообмена растущей корки с подложкой и валком.

Процесс литья армированной хлористомедной ленты в валки-кристаллизаторы можно разделить на три стадии: стадию намораживания сплава хлористой меди на валки и сетку в ванне с расплавом; стадию затвердевания и охлаждения отливки на одном из валков; стадию охлаждения валков на воздухе [4].

При составлении общей математической модели были приняты следующие допущения. Толщина намерзающей корочки и формирование свойств отливки в основном зависят от теплового потока в кристаллизатор. Процесс квазистационарен во времени. В двухфазной зоне принимали равномерное распределение теплоты кристаллизации в интервале температур ликвидус–солидус путем введения эффективной теплоемкости. Распространение тепла теплопроводностью по глубине ванны с расплавом незначительно. Вследствие этого на каждом шаге по времени определяли одномерное распределение температур в одной из симметричных областей, перпендикулярных оси валков (рис. 2).

С учетом сделанных допущений математическая модель затвердевания сплава, кристаллизующегося в интервале температур, была представлена в виде:

$$\omega \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial \varphi} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \omega \rho_1 L \frac{d\psi}{d\varphi}, \quad (5)$$

где $\psi(T_1, \tau) = \frac{V_{ТВ}}{V_0} = \frac{T_n - T_1}{T_n - T_c}$ – относительное коли-

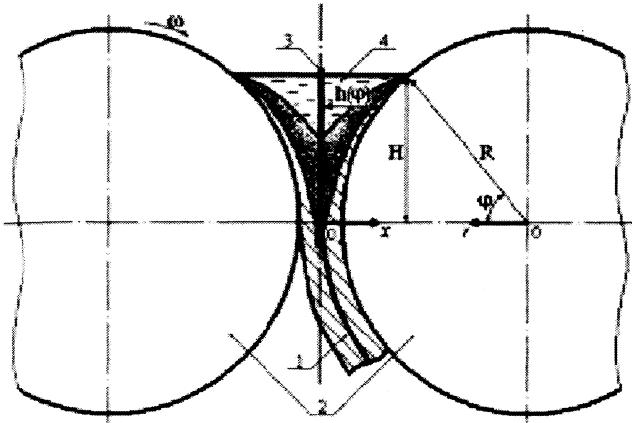


Рис. 2. Схема непрерывного литья армированной хлористо-медной ленты в валковый кристаллизатор: 1 – отливка; 2 – валки-кристаллизаторы; 3 – медная сетка; 4 – расплав; H – высота ванны с расплавом; R – внешний радиус вала; ω – угловая скорость вращения валков; φ – угловая координата; $h(\varphi)$ – размер расчетной области

чество твердой фазы; $V_{\text{тв}}$ – объем твердой фазы в двухфазной зоне; V_0 – объем двухфазной зоны; $T_{\text{л}}$ – температура ликвидус; $T_{\text{с}}$ – температура солидус; ρ_1 , c_1 , λ_1 – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность отливки.

На контактных поверхностях отливки с кристаллизатором и сеткой принимали граничные условия третьего рода с коэффициентами контактного теплообмена.

Для исследования комплекса одновременно протекающих процессов намораживания на валке и сетке рассматривали плоскую медную ленту, масса 1 м^2 которой соответствует массе 1 м^2 сетки. Исходя из известной массы 1 м^2 медной сетки с диаметром проволочек $d = 150 \text{ мкм}$ ($m = 0,42 \text{ кг}$), толщина эквивалентной ленты $\delta_{\text{с}}$ составила 54 мкм [4].

В результате математическая модель намораживания хлористой меди на сетке имеет вид:

$$\omega \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial \varphi} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где ρ_3 , c_3 , λ_3 – соответственно плотность, удельная теплоемкость и теплопроводность меди.

Математическая модель теплообмена в валке имеет вид, аналогичный (1).

Формирование отливки в ручье колеса при литье в кристаллизатор типа “колесо–лента” происходит в условиях ее теплообмена с поверхностями ручья кристаллизатора [5]. Поэтому решение задачи нестационарного теплообмена осуществляли с помощью двумерной математической модели. Рассматривали три зоны теплообмена, имеющие отличительные особенности. Интенсивность охлаждения ленты в зонах, ограниченных углами φ_1 и φ_2 , различна. Значительно отличаются интенсивность и характер теплообмена внутренней поверхности рабочего колеса в зоне формирования отливки $\varphi_1 + \varphi_2$ и зоне охлаждения колеса

φ_3 (рис. 3). Поэтому математические модели, описывающие процесс теплообмена для каждой из зон, также имеют свои особенности.

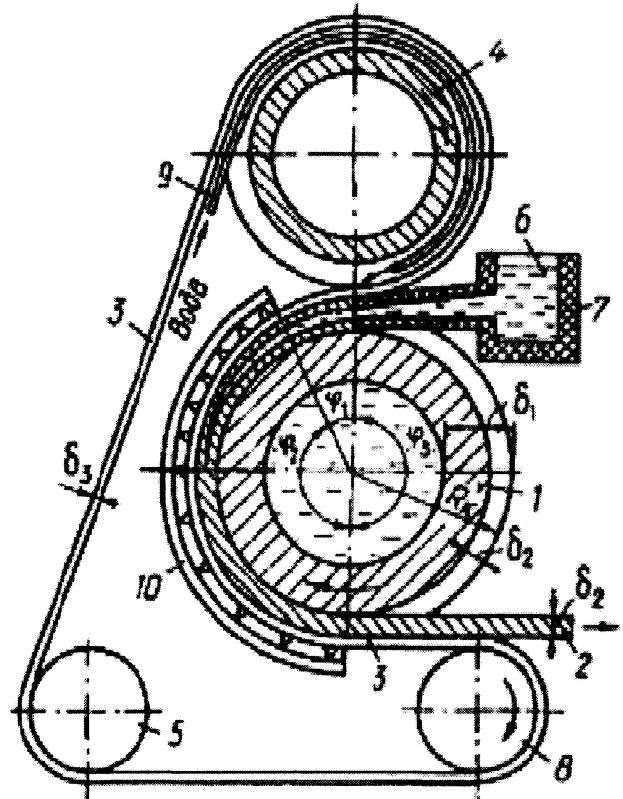


Рис. 3. Схема непрерывного литья полосы в кристаллизатор “колесо–лента”: 1 – формообразующее колесо; 2 – отливка; 3 – рабочая лента; 4 – прижимной ролик; 5 – натяжной ролик; 6 – расплав; 7 – питатель; 8 – приводной ролик; 9 – охладитель ленты верхний; 10 – охладитель ленты боковой; R_k – внешний радиус колеса; δ_1 – толщина колеса, δ_2 – глубина ручья колеса и толщина отливки; φ_1 , φ_2 и φ_3 – расчетные зоны

Для описания процесса затвердевания металлов использовали метод “размазывания” фронта фазового перехода, основанный на введении фиктивного интервала затвердевания в окрестности температуры кристаллизации. Этот метод позволяет уйти от прямого решения задачи Стефана для чистых металлов и узкоинтервальных сплавов, так как ее решение для двумерных областей является достаточно сложной проблемой.

Решение сопряженных систем уравнений теплопроводности для всех рассмотренных процессов литья с учетом граничных условий третьего рода на контактных поверхностях проводили методом конечных разностей по неявной схеме.

Рассмотренные подходы к математическому моделированию процессов непрерывного литья в валковый кристаллизатор характеризуются наличием особенностей, присущих только одному из них, разнообразием постановок задач и методов их реализации. Разработанные программные комплексы использовали на всех стадиях разработки технологических процессов литья: от проектиро-

вания технологических установок до определения оптимальных режимов литья с использованием адаптированного к реальным условиям программного обеспечения.

Требования к представлению результатов моделирования и оптимизации, как правило, значительно разнообразнее методик моделирования и в каждом случае носят индивидуальный характер. К примеру, при моделировании процесса литья в кристаллизатор типа “колесо–лента” необходимо было представить результаты расчета в графическом виде с целью визуально отслеживать динамику затвердевания отливки со стороны колеса и ленты, чтобы оперативно корректировать интенсивность охлаждения поверхности ленты.

Поэтому можно сделать вывод, что разработка специализированного профильного программного обеспечения зачастую является наиболее эффектив-

ным и единственным средством автоматизированного проектирования новых литейных технологий.

Литература

1. Голод В.М., Радгударзи Т.А., Луковникова Д.А., Савельев К.Д. САПР литейной технологии. Профильная ориентация и новые возможности // Литейное производство. 2000. № 7. С. 46–49.
2. Барановский Э.Ф., Севастьянов П.В. Идентификация теплообмена при литье металлов и сплавов. Мн.: Наука и техника, 1989.
3. Бобров В.Н., Пумпур В.А., Севастьянов П.В. Математическая модель несимметричного охлаждения в валках-кристаллизаторах // Науч. и прикл. проблемы энергетики. 1987. Вып. 14. С. 81–83.
4. Барановский Э.Ф., Ильюшенко В.М., Пумпур В.А. Математическое моделирование процесса формирования армированной хлористомедной ленты // Литье и металлургия. 2003. № 3. С. 17–19.
5. Барановский Э.Ф., Пумпур В.А. Математическая модель и программа расчета теплообмена при непрерывном литье полосы в кристаллизатор “колесо–лента” // Литье и металлургия. 2000. № 1. С. 28–30.