

УДК 621.746.047.001.57

Компьютерная система “ПроТерм-1н” для моделирования ступенчатого нагрева слитков

А. Н. Чичко, Н. В. Андрианов,
А. С. Бороздин
Белорусский национальный технический
университет,
РУП “Белорусский металлургический завод”

Методы клеточно-автоматного моделирования [1 – 5] позволяют визуализировать процессы нагрева слитков любой конфигурации и тем самым целенаправленно улучшать тепловые режимы. На базе разработанных математических моделей [6 – 9] создаются программные системы разного технологического назначения. Одна из таких систем — “ПроТерм-1н” предназначена для моделирования процессов нагрева и окисления в слитках, движущихся в многозонных печах.

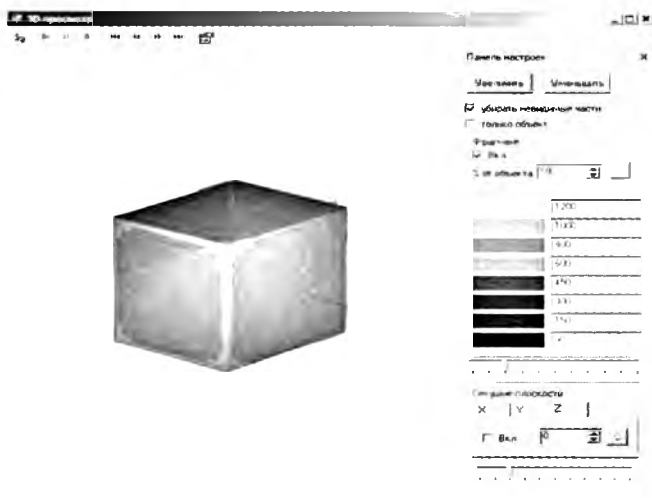
Предлагаемые компьютерные модели учитывают скорости движения слитка и возможности формирования сложных температурных конфигураций рабочего пространства печи. Программный пакет позволяет рассчитывать и наблюдать динамику изменения полей температур и процессов окисления, отслеживать напряженно-деформированное состояние слитка во всем объеме печи и в любой момент времени. В состав пакета также входят программы для 2D- и 3D-визуализации результатов расчетов, построения временных диаграмм для важнейших характеристик процесса. На рис. 1 показаны трехмерные изображения фрагментов слитка и печи.

В программе моделирования задаются сечение печи, ее размеры, начальное положение и скорость движения слитка. Температурное поле нагревающей среды может

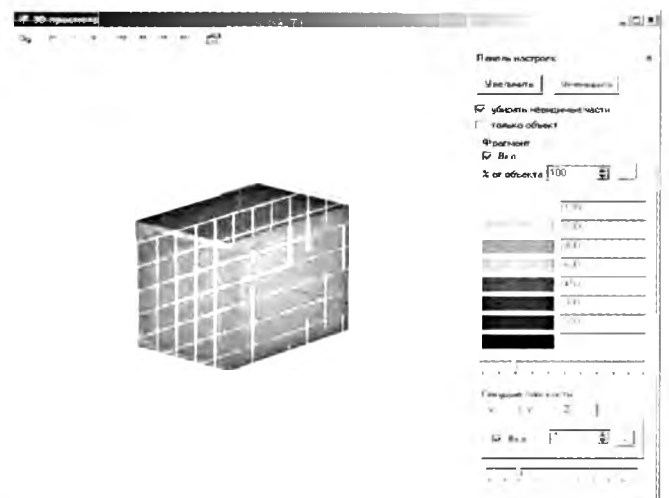
быть описано в виде набора тепловых зон с указанием их температуры и протяженности или в виде кривой нагрева с автоматическим разбиением на однородные зоны с любой требуемой точностью. При постановке задачи также необходимо указать теплофизические свойства нагревающей среды и материал слитка, которые можно выбрать из базы данных.

Далее на это описание накладывается конечно-разностная сетка, позволяющая построить клеточно-автоматную модель объекта и нагревающей среды. Для этого требуется задание дискретности разбиения, которое проводится в автоматическом режиме. На следующем этапе каждой клетке присваиваются параметры, характеризующие теплофизические свойства материалов заготовки и нагревающей среды, соответствующие реальным. На клеточно-автоматную модель переносятся и начальные состояния объекта моделирования и среды. Далее в зависимости от поставленной задачи определяются необходимые виды численного моделирования, когда результаты расчетов для определенного момента времени служат исходными данными для следующего. Процесс моделирования состоит в последовательном проведении заданных расчетов.

Математические модели в алгоритмах пакета “Про-



а



б

Рис. 1. Фрагмент расчета температурных полей слитка: а — поверхность; б — сечение

Терм-1n” разработаны на основе фундаментальных термодинамических и физико-химических закономерностей, а также на эмпирических зависимостях, полученных на основе результатов многочисленных экспериментов. Основное дифференциальное уравнение теплопроводности в декартовых координатах может быть записано в следующем виде:

$$c(T)\rho(T)\partial T/\partial\tau = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda(T)\partial T/\partial x) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda(T)\partial T/\partial y) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda(T)\partial T/\partial z), \quad x, y, z, \tau \in \Omega, \quad (1)$$

где $c(T)$ — функция теплоемкости, Дж/(кг · К); $\rho(T)$ — функция плотности, кг/м³; $\lambda(T)$ — функция теплопроводности, Вт/(м · К); Ω — ($0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y, 0 \leq z \leq Z, 0 \leq \tau \leq t$) — пространственно-временная область расчета.

Для задания начальных и граничных условий, определяющих взаимодействие между нагревающей средой и поверхностью слитка, перемещающегося с заданной скоростью в разных тепловых зонах, использовали следующую систему уравнений [10, 11]:

$$T(x, y, z, \tau) = \begin{cases} T_0, \tau = 0, \\ T_i, \quad 0 < \tau \leq L_i / v, \\ T_2, L_i / v < \tau \leq (L_i + L_2) / v, \\ \dots \\ T_n, \sum_{k=1}^n L_k / v < \tau \leq \sum_{k=1}^n L_k / v. \end{cases} \quad (2)$$

где T_0 — начальная температура заготовки; n — число тепловых зон в рабочем пространстве печи; T_i ($i = 1, 2, \dots, n$) — значение температуры в тепловой зоне i , °С; L_i ($i = 1, 2, \dots, n$) — протяженность тепловой зоны i , м; v — скорость перемещения заготовки вдоль рабочего пространства печи, м/с.

Численное конечно-разностное решение задачи теплопроводности реализовано на экономичных неявных трехмерных схемах, что позволяет моделировать заготовки произвольной конфигурации.

Математическая модель задачи расчета температурных напряжений и деформаций основана на совместном решении трех систем уравнений из теории термоструктуры [12]:

дифференциального уравнения равновесия в точке твердого тела:

$$\partial\sigma_{ii}/\partial i + \partial\sigma_{ij}/\partial j + \partial\sigma_{ik}/\partial k + f_i = 0, \quad (3)$$

где $i = x, y, z; j = y, z, x; k = z, x, y$; σ_{ii} — нормальные напряжения по оси i ; σ_{ij} — касательные напряжения; f_i — компоненты объемных сил;

второй формы обобщенного закона Гука, учитывающего влияние температурных деформаций на напряжения:

$$\begin{cases} \epsilon_{ii} = 1/E[\sigma_{ii} - \nu(\sigma_{jj} - \sigma_{kk})] + \alpha T, \\ \epsilon_{ij} = \sigma_{ij}/(2G), \end{cases} \quad (4)$$

где $G = E/(2(1+\nu))$ — модуль сдвига; $\epsilon_{ij}, \epsilon_{ji}$ — компоненты тензора деформаций; α — коэффициент линейного расширения материала; ν — коэффициент Пуассона; E — модуль Юнга;

уравнения Коши, определяющего соотношения между деформациями и перемещениями:

$$\begin{cases} \epsilon_{ii} = \partial u_i / \partial i, \\ \epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\partial u_i / \partial j + \partial u_j / \partial i), \end{cases} \quad (5)$$

где u_i — компоненты вектора перемещения. Конечно-разностная аппроксимация систем (3) – (5) решается неявными итерационными методами.

Процесс высокотемпературного окисления моделируется по эмпирическим уравнениям, предполагающим параболический закон образования окалины:

$$S^2 = K\tau, \quad (6)$$

где S — прирост массы окалины, кг/м²; τ — время окисления, с; K — константа скорости окисления. При постоянном давлении кислорода в нагревающей среде K определяют по закону Аррениуса [12]:

$$K = k_0 \exp(-Q/RT), \quad (7)$$

где k_0 — константа; Q — энергия активации, кал/моль; R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура, К.

Конкретные значения для уравнения (7) определяют эмпирически, они зависят от характеристик нагревающей среды (процентное содержание влаги, кислорода и др.) и химического состава заготовки. Математическая часть построена на принципах модульности и расширения. Она достаточно легко может быть дополнена новыми расчетами и эмпирическими зависимостями.

Программное обеспечение записано в визуальной среде быстрой разработки программ Borland Delphi 6.0 на языке Object Pascal. Программная реализация может быть разделена на три уровня, что позволяет рассматривать независимо друг от друга интерфейс пользователя, алгоритмы и данные. Основное преимущество такого разделения состоит в повышении степени повторного использования для компонент каждого из уровней. На рис. 2 показан крупноблочный программный архитектурный каркас “ПроТерм-1n”, который состоит из ключевых модулей системы и взаимосвязей между ними. В составе системы можно выделить три группы компонент: работа с данными, алгоритмы и визуальные компоненты интерфейса пользователя.

Компоненты для работы с данными отвечают за взаимодействие с двоичными и текстовыми файлами. В бинарном формате хранятся файлы моделей и данные расчетов в виде “снимков” в определенные моменты времени. При моделировании промышленных заготовок работа идет с файлами 100 – 900 Мб. В текстовых форматах хранятся протоколы алгоритмов расчета, данные с контрольных точек, а также дополнительная информация. Как правило, данные с текстовых файлов могут быть использованы для дополнительного анализа (например, построение графиков, диаграмм, гистог-

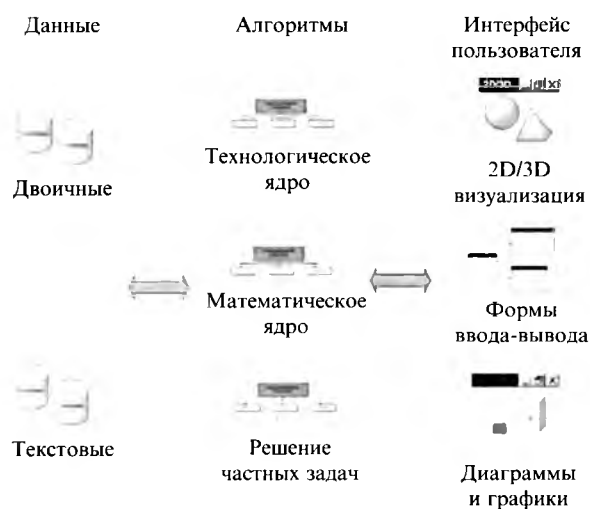


Рис. 2. Общая схема взаимодействия компьютерной системы “ПроТерм-1n”

рамм, создание таблиц), который при необходимости могут выполнить система “ПроТерм-1n” или внешние пакеты.

Интерфейсная часть содержит разные формы и визуальные компоненты, через которые взаимодействуют пользователь и компьютерная система. В данную группу входят главное окно программы, диалоговые окна ввода данных для проведения расчетов, разные выходные формы. Компоненты данной группы используют для построения диаграмм и графиков текстовых файлов. В эту группу также входят модули, при помощи которых проводится 2D/3D-визуализация содержимого файлов моделей и рассчитанных двоичных данных.

Научекомкие компоненты и модули представлены в группе алгоритмов, которая отвечает за функциональное наполнение программы. В эту группу входят компоненты и модули математического ядра, реализующие вычислительные схемы и алгоритмы. Технологическое ядро формирует архитектурно-программный каркас системы. Группа также содержит решения частных задач.

Компонентно-модульная система “ПроТерм-1n” позволяет достаточно быстро построить уникальные программные решения с учетом специфических требований пользователей и оптимизировать их для конкретного технологического процесса. Минимальные требования к аппаратному обеспечению достаточно скромны. Пакет может с приемлемой скоростью проводить расчет на компьютере класса Pentium-I со 128 Мб ОЗУ. Тем не менее для расчета промышленных заготовок с высокой точностью требуется компьютер Pentium-IV с 512 Мб ОЗУ и более.

С помощью пакета “ПроТерм-1n” выполнили расчеты окисления и температурных напряжений для слитка размерами 250×250×300 мм, движущегося с заданной скоростью при разных режимах нагрева. Начальная температура слитка принималась равной $t_0 = 20$ °С. При численном моделировании процесса нагрева слиток двигался вдоль печи с равномерной скоростью $v = 0,004$ м/с. Ось координат X совпадала с направлением движения слитка.

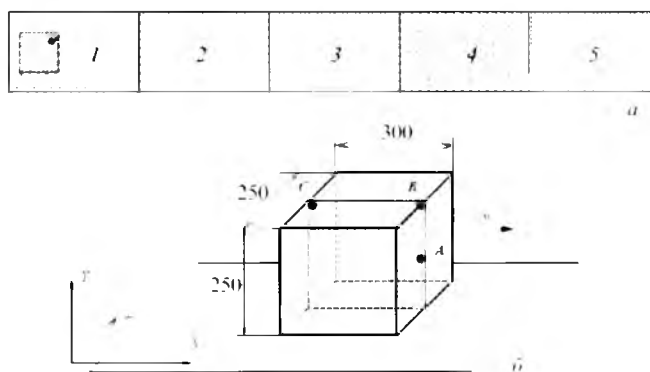


Рис. 3. Схема рабочего пространства печи (а) и модель слитка с контрольными точками (б)

Таблица 1. Температурные режимы печи при моделировании процесса окисления (слева от косой черты) и напряжений (справа от косой черты)

Режим	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_4, ^\circ\text{C}$	$t_5, ^\circ\text{C}$
1	1200/800	1200/800	1200/800	1200/800	1200/800
2	300/180	300/330	500/490	800/640	1200/800
3	200/200	600/350	950/500	1100/550	1200/800

В соответствии с поставленными задачами построили компьютерную модель промышленной печи с пятью зонами с температурой $t_1 - t_5$. Протяженность каждой температурной зоны равна 4 м, общая длина печи составила 20 м. Было принято, что пространство печи заполнено воздухом: $\lambda = 0,034$ Вт/(м · К), $c = 1009$ Дж/(кг · К), $\rho = 1,29$ кг/м³, температура зависит от конкретной тепловой зоны. В качестве материала была выбрана сталь 40X с теплофизическими характеристиками — функциями от температуры слитка.

Компьютерные расчеты проводили при пространственном шаге $h_x = h_y = h_z = h = 0,02$ м и временном $h_t = 5$ с, который определяли как время, необходимое слитку для смещения на один шаг по оси X при заданной скорости. На рис. 3, а показана схема рабочего пространства печи. При моделировании варьировали значения температур в зонах рабочего пространства печи. В табл. 1 приведены температурные режимы, для которых проводили вычислительные эксперименты. Моделирование проводилось для 3400 с нагрева, за которые при указанной скорости слиток проходит вдоль всего рабочего пространства печи.

Расчет окисления слитка выполняли по экспериментальным зависимостям для хромистых сталей [13], при этом учитывали индукционный период. Для анализа образования окалины на поверхности заготовки были выбраны три контрольные точки, рассчитанные значения температуры и окалины в которых сохранялись. На рис. 3, б показаны поперечное сечение слитка и расположение выбранных контрольных точек. В табл. 2 представлены результаты вычислений толщины окалины в этих точках. Из полученных данных видно, что для режима 1 индукционный период заканчивается достаточно быстро и образование окалины идет в основном по параболическому закону. Для режима 2 макс-

Таблица 2. Изменение толщины окалины ($\text{мг}/\text{см}^2$) в контрольных точках A/B/C слитка для разных тепловых режимов нагрева

Время, с	Режим 1	Режим 2	Режим 3
0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
500	0,021/11,339/0,018	0/0/0	0/0/0
1000	12,299/23,011/14,131	0/0/0	0/0/0
1500	22,232/32,179/23,943	0/0/0	0/0/0
2000	30,788/39,856/32,352	0,001/0,001/0,001	0,001/0,001/0,001
2500	38,294/46,522/39,706	0,001/0,001/0,001	0,003/0,021/0,004
3000	44,963/52,457/46,240	0,001/0,001/0,001	0,029/0,056/0,033
3400	49,811/56,799/50,994	0,001/0,001/0,001	0,049/7,867/0,053

мальная температура в контрольных точках слитка не достигла 800°C и процесс окисления не вышел за пределы индукционного. Необходимо также отметить, что для всех режимов в точке B нагрев и образование окалины проходят очень быстро.

На рис. 4 показаны динамические кривые температурных напряжений, рассчитанные при проведении вычислительного эксперимента. В процессе моделирования на каждой итерации после расчета напряжений в слитке определяли ее максимальное и минимальное значения. По представленным зависимостям видно, что при нагреве слитка по режиму 2 (рис. 4, кривая б) наблюдаются меньшие по абсолютной величине перепады температурных напряжений, которые в случае реального процесса могут привести к образованию трещин в нагреваемом слитке и стать причиной брака.

Заключение

Таким образом, систему “ПроТерм-Ин” эффективно используют для компьютерных расчетов процесса нагрева, что позволяет уменьшить число экспериментальных исследований. Результаты вычислительных экспериментов демонстрируют возможности компьютерного моделирования, прогнозирования и анализа температурных полей, окислительных процессов, напряжений и деформаций, возникающих при нагреве слитков с динамическими характеристиками нагревающей среды.

Библиографический список

1. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Соболев В. Ф., Чичко О. И. Компьютерное моделирование в задачах термоупругости сложных пространственных деталей // Изв. вузов. Энергетика. 2003. № 3. С. 68 – 74.
2. Чичко А. Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестник БНТУ. 2003. № 2. С. 42 – 48.
3. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г. Комплекс программных средств “ПРОЛИТ” для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов // Программные продукты и системы. 2002. № 4. С. 47 – 48.
4. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Чичко О. И., Соболев В. Ф. Новые подходы в компьютерном моделировании усадочной пористости для трехмерных кристаллизующихся отливок // Доклады НАН Беларуси. 2003. Т. 47. № 4. С. 118 – 121.

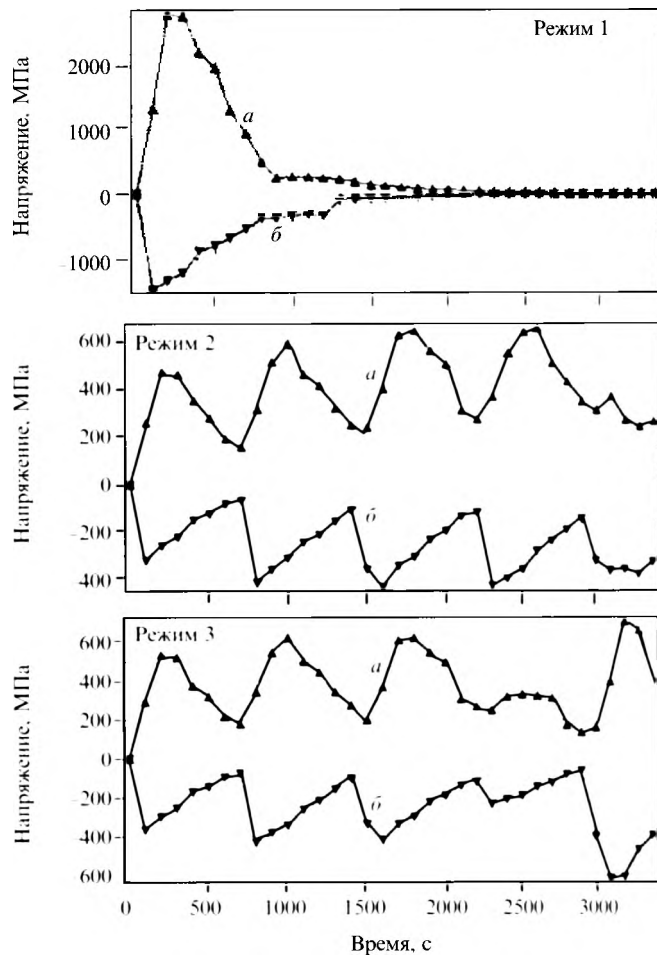


Рис. 4. Зависимость растягивающих (а) и сжимающих (б) напряжений от длительности перемещения слитка в печи для режимов нагрева 1–3

5. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Яцкевич Ю. В. и др. Моделирование эволюции термических и механических напряжений стального слитка, получаемого методом непрерывной разливки при радиальном вытягивании // Доклады НАН Беларуси. 2003. Т. 47. № 5. С. 119 – 123.
6. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г., Лукашевич Ф. С. Компьютерная система “ПроЛит-1” для моделирования течения и охлаждения расплавов // Литье и металлургия. 2003. № 4. С. 64 – 72.
7. Чичко А. Н., Леонтьев А. А. Компьютерное моделирование процессов нагрева тел с 3d-геометрией // Весті НАНБ. Сер. фіз.-техн. навук. 2001. № 3. С. 135 – 138.
8. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г. Компьютерная система “ПроЛит” — инструмент для повышения качества // Техника. Экономика. Организация. 2001. № 6. С. 30 – 31.
9. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Соболев В. Ф. Компьютерная система “ПроТерм”: применение для управления процессом термической обработки деталей // Техника. Экономика. Организация. 2002. № 1. С. 22 – 23.
10. Чичко А. Н., Бороздин А. С. Численное моделирование процесса нагрева движущегося слитка // Литье и металлургия. 2003. № 4. С. 60 – 63.
11. Чичко А. Н., Андрианов Н. В., Бороздин А. С., Тищенко В. А. О путях численного анализа высокотемпературного окисления движущихся слитков в печах со ступенчатым нагревом // Литье и металлургия. 2004. № 3. С. 145 – 151.
12. Боли Б., Уэзер Дж. Теория температурных напряжений. — М.: Мир, 1964. — 517 с.
14. Ученые записки Ленинградского университета. 1954. Вып. 14. № 175.