



The mathematical apparatus for calculation of process of thermal heating and cooling of the detail which is situated in modeling environment of the furnace is presented. Modules of the software "ProTerm-1" in the environment of visual programming Delphi 7.0 for operating system Windows 95/98/2000XP vista are described.

А. Н. ЧИЧКО, Д. М. КУКУЙ, В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОВЗОВ, О. А. САЧЕК, БНТУ

УДК 621.74

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ В САЕ «ПРОТЕРМ-1»

Моделирование термической обработки промышленных деталей является одной из сложнейших задач металлургии. Существующие в настоящее время методы выбора режимов термообработки, как правило, не учитывают геометрию деталей и поэтому используемые и разрабатываемые на практике режимы часто далеки от оптимальных, что приводит к дополнительным затратам энергии при проведении термической обработки деталей. Неравномерность нагрева различных участков детали, а также невозможность учета неоднородности температурного поля печи при разработке режимов термообработки могут приводить к дефектам детали, связанным со структурными превращениями и, как следствие, браку изделий.

Современные компьютерные методы расчета температурного поля нагреваемой детали позволяют выбрать наилучшие режимы термообработки с учетом пространственной геометрии детали. Расчет эволюции изменения температуры в любой точке детали позволяет «визуализировать» и предсказать дефекты различных участков сложной в пространственном отношении детали. Особенно важно то, что температурное поле может быть пересчитано в неравновесное микроструктурное поле сплава детали, моделирование которого имеет как научный, так и практический интерес.

В работах [1, 2] для моделирования процессов течения металла в литейных формах был описан программный продукт «ПроЛит-1», в котором реализованы два модуля, позволяющие совместно решать гидродинамическую и тепловую задачи охлаждения движущегося металла в литейной форме. Однако в этом пакете не решается задача моделирования процессов нагрева деталей в печах. Поэтому для моделирования процессов термообработки необходимо разработать специальное програм-

мное обеспечение, которое в дальнейшем будет называться САЕ «ПроТерм-1».

Известно, что моделирование процесса термической обработки детали имеет свои специфические особенности. Поэтому для процессов термической обработки необходимо иметь самостоятельный программный продукт, не перегруженный излишней математикой и в то же время имеющий свой интерфейс для решения задач, связанных с термической обработкой. В частности, при моделировании термообработки детали важным параметром является время выдержки металла в печи, которое иногда может значительно превышать времена течения металла в форме. К тому же важным элементом термообработки является процесс структурообразования, который не учитывается при решении гидродинамических задач. Это все делает актуальным разработку специального пакета «ПроТерм-1», являющегося одним из «клонов» программы «ПроЛит-1». Известно, что детальный расчет процессов нагрева и охлаждения деталей в печах может быть проведен с помощью численных моделей, построенных на основе уравнения теплопроводности [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{c(T)\rho} \left(\frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} + \frac{\partial \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right)}{\partial z} + F(x, y, z, \tau) \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность сплава; τ – время; T – температура в рассматриваемой точке (x, y, z, τ) ; λ и c – соответственно теплопроводность и теплоемкость сплава; $F(x, y, z, \tau)$ – функция объемной плотности мощности выделения теплоты, которая строится с учетом типа сплава.

При рассмотрении уравнения теплопроводности для детали необходимо учитывать начальные и граничные условия процесса. Нами использованы граничные условия 3-го рода (в «ПроТерм-1» вид граничных условий может задаваться), описывающие процесс передачи тепла на границе «деталь – печная среда»:

$$\alpha \Delta T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2)$$

Для решения математической модели (1)–(2) использовали конечно-разностные трехмерные аппроксимации, основанные на методе конечных объемов. Численные схемы были реализованы с помощью среды визуального программирования Delphi 7.0 для операционных систем Windows 95/98/2000/XP/Vista в виде модуля «ПроТерм-1». Программное обеспечение предназначено для численного моделирования процесса термической обработки детали. Входными параметрами моделирования могут быть теплофизические характеристики среды и детали, такие, как плотность, теплоемкость, теплопроводность, теплоты структурных превращений и им соответствующие температуры и т. д. Результатами моделирования являются пространственно распределенные поля температур для заданного времени, значения которых ассоциируются с заданным цветом. На рис. 1 показан пример просмотра температурного поля в центральном сечении детали в программе «ПроТерм-1».

При просмотре результатов во время моделирования все изменения параметров сеточных элементов динамически отображаются на изображениях сечений, что позволяет пользователю непосредственно наблюдать изменение температуры во времени в выделенных сечениях детали. Состоя-

ние отливки, как во время всего процесса расчета, так и в любой момент времени, можно сохранить в отдельном файле для дальнейшей детализации и изучения. Данная версия «ПроТерм-1» состоит из трех модулей: «Проектирование», «Расчет» и «Просмотр».

Алгоритм работы пользователя с программой «ПроТерм» приведен ниже.

Шаг 1. Подготовить файл детали в формате *. stl твердотельного моделирования.

Шаг 2. С использованием модуля «Проектирование» импортировать файл детали *. stl в файл формата *. prj. Для этого с помощью мастера в диалоговых окнах пункта меню «Файл/Импорт» задать параметры для отливки (температура формы и заливки, тип металла и формы) и параметры сетки разбиения (число ячеек формы, шаг разбиения и параметры вращения отливки).

Шаг 3. С использованием модуля «Расчет» произвести для файла детали в формате *. prj моделирование процесса заполнения металлом формы, его охлаждения и кристаллизации (пункт меню «Файл/Открыть...»). Для расчета необходимо задать значения шагов по времени для теплообмена, а также параметры записи процесса в файл с помощью мастера в диалоговых окнах пункта меню «Расчет/Мастер подготовки...». После окончания расчета можно просмотреть результаты моделирования с помощью модуля «Просмотр».

Модуль «Просмотр» позволяет провести послойный анализ состояния детали (пункт меню «Файл/Открыть...») с заданной детализацией температур по сечениям XY, XZ, YZ. Выбор сечения и типа отображаемого параметра (материал, температура) производится с помощью пункта меню «Вид/Плоскость». С использованием скроллинга

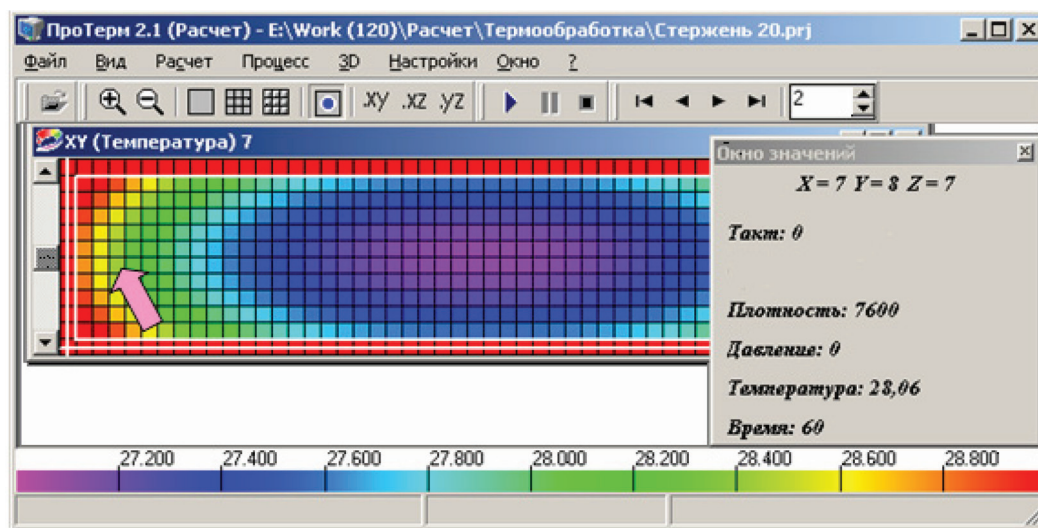


Рис. 1. Фрагмент моделирования в САЕ «ПроТерм-1» температурного поля в центральном сечении детали в программе «ПроТерм-1»

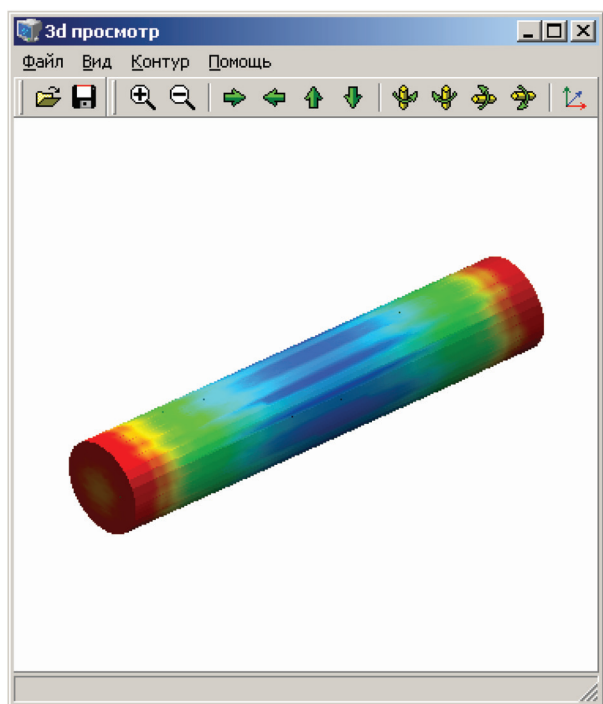


Рис. 2. Визуализация температурного поля на трехмерном изображении детали

в окне просмотра можно передвигаться по недостающей оси координат и последовательно просматривать необходимые сечения детали. Данный модуль позволяет просматривать сохраненные кадры процесса в ручном и автоматическом режимах. С помощью пункта меню «Графики» можно произвести вывод на экран зависимостей $T = f(t)$ для заданного сеточного элемента детали. Модуль «Просмотр» с помощью функций библиотеки OpenGL позволяет также визуализировать результаты моделирования в виде полей температуры для трехмерного изображения детали с возможностями масштабирования и вращения объекта (пункт меню «3D/Просмотр»). Так, на рис. 2 показана визуализация температурного поля на трехмерном изображении отливки. Следует отметить, что с целью устранения неточностей при совмещении ре-

зультатов моделирования с исходной геометрией отливки (формат *. stl) для данного режима трехмерной визуализации был разработан новый формат файла *. stc. Файл такого типа создается на начальном этапе во время импорта файла *. stl в файл формата *. prj и заполняется модифицированными треугольниками в соответствии с сеткой разбиения. Файл *. stc может быть представлен только в бинарном формате и отличается от файла *. stl тем, что каждая вершина треугольника, кроме координат в пространстве, имеет переменную размером 4 байта, в которой хранится цвет вершины.

Следует отметить, что в программе «ПроТерм-1» возможна коррекция цветов полей параметров в окне просмотра с помощью указания минимальных и максимальных значений параметров в диалоговом окне пункта меню «Настройки/Цветопередача...».

Численное моделирование нагрева чугунных стержней

С помощью разработанного программного обеспечения было проведено моделирование процесса нагрева чугунных стержней диаметрами 10 и 20 мм, твердотельные модели которых приведены на рис. 3.

На рис. 4, 5 показаны результаты моделирования нагрева чугунных стержней диаметрами 10 и 20 мм в виде температурных полей на момент времени 60 с для центральных сечений отливок (плоскость XY). Как видно из рисунков, температура в стержнях на данный момент времени распределяется неравномерно, наиболее нагретыми частями являются торцы и поверхность стержней, в то время как сердцевина имеет более низкую температуру. Также следует отметить, что стержень диаметром 10 мм успевает за 60 с прогреться на большую температуру, чем стержень диаметром 20 мм. Различия в нагреве стержней с разными диаметрами видны также и на рис. 6, на котором показаны изменения температур в центре стержня на протяжении всего процесса термообработки.

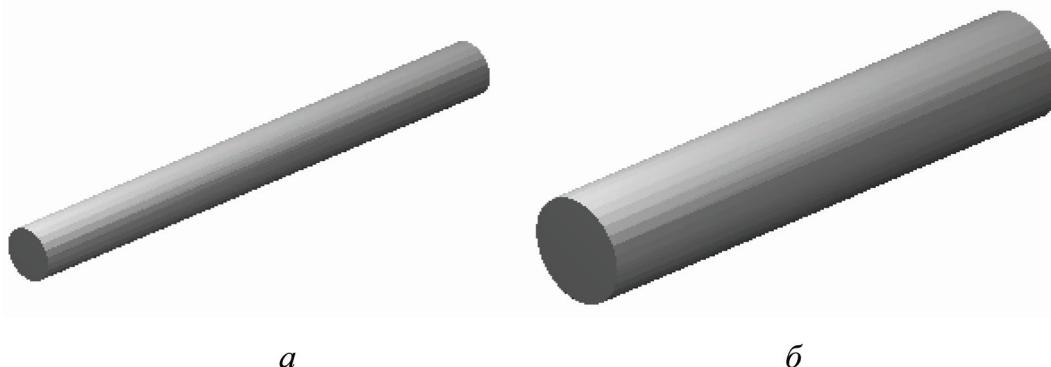


Рис. 3. Варианты чугунных 3d-стержней различных диаметров: а – диаметр 10 мм; б – диаметр 20 мм

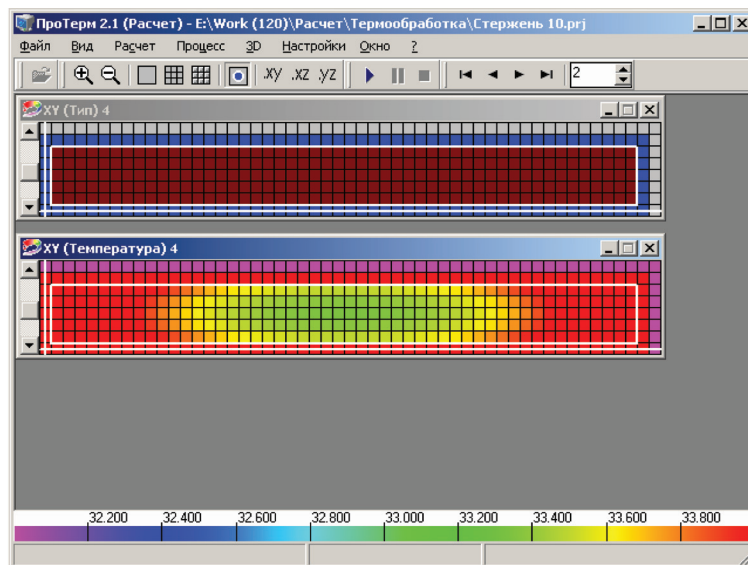


Рис. 4. Интерфейс «ПроТерм-1». Результаты моделирования нагрева чугуна диаметром 10 мм в виде температурных полей на момент времени 60 с (плоскость XY , центральное сечение)

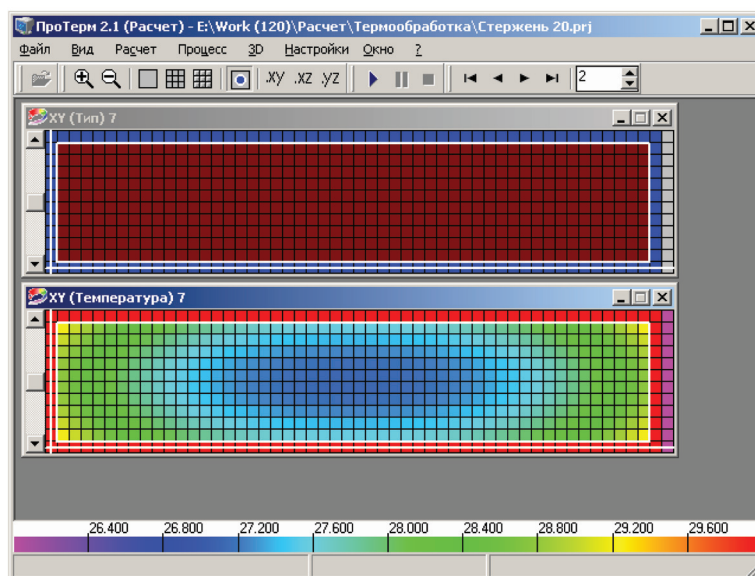


Рис. 5. Интерфейс «ПроТерм-1». Результаты моделирования нагрева чугуна диаметром 20 мм в виде температурных полей на момент времени 60 с (плоскость XY , центральное сечение)

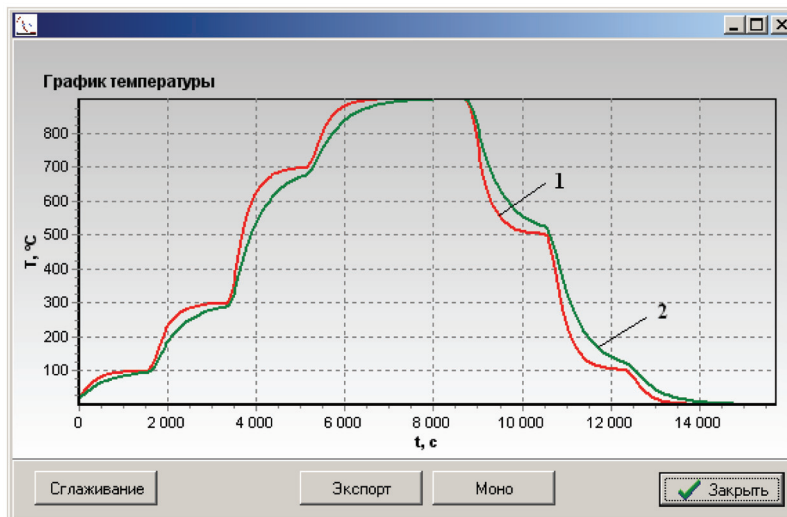


Рис. 6. Изменение температур в процессе термообработки в центре стержня для различных диаметров (плоскость XY , центральное сечение): 1 – диаметр 10 мм; 2 – диаметр 20 мм

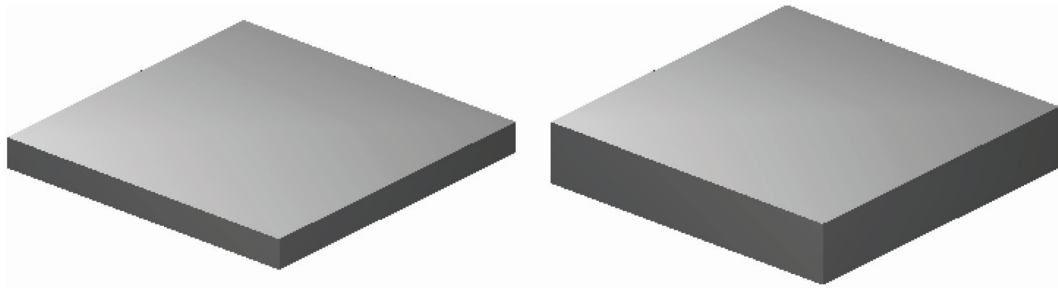


Рис. 7. Варианты 3d-плит различной толщины: а – 10 мм; б – 20 мм

Численное моделирование нагрева плоскостных деталей

С помощью разработанного программного обеспечения «ПроТерм-1» было проведено моделирование процесса нагрева плоскостных деталей толщи-

ной 10 и 20 мм, твердотельные модели которых показаны на рис. 7.

На рис. 8, 9 приведены результаты моделирования нагрева плоскостных деталей толщиной 10 и 20 мм в виде температурных полей на момент

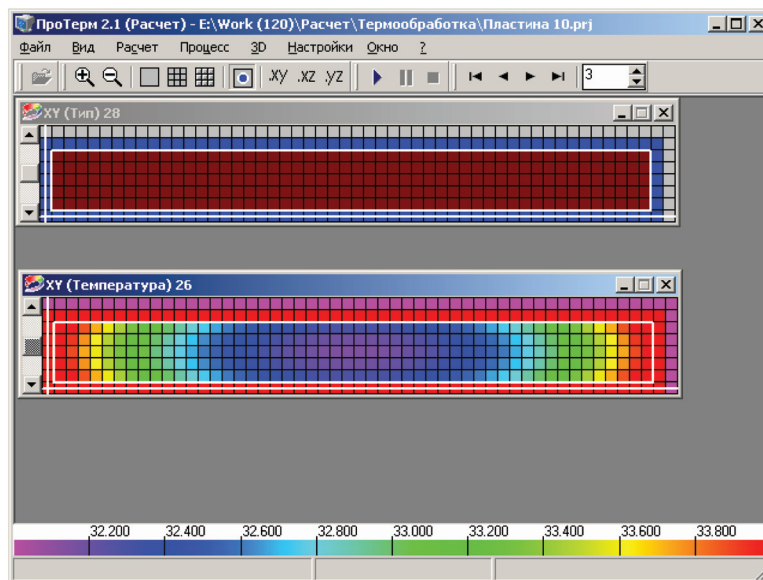


Рис. 8. Интерфейс «ПроТерм-1». Результаты моделирования нагрева пластины толщиной 10 мм в виде температурных полей на момент времени 60 с (плоскость XY, центральное сечение)

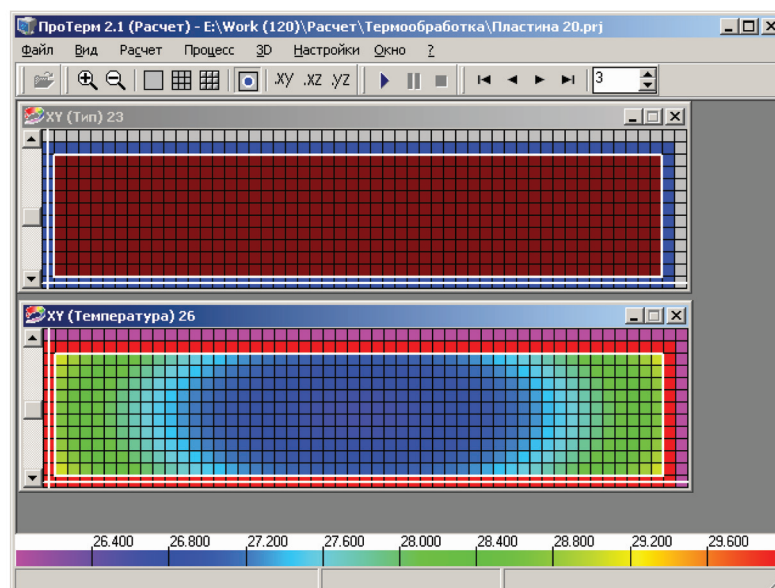


Рис. 9. Интерфейс «ПроТерм-1». Результаты моделирования нагрева пластины толщиной 20 мм в виде температурных полей на момент времени 60 с (плоскость XY, центральное сечение)

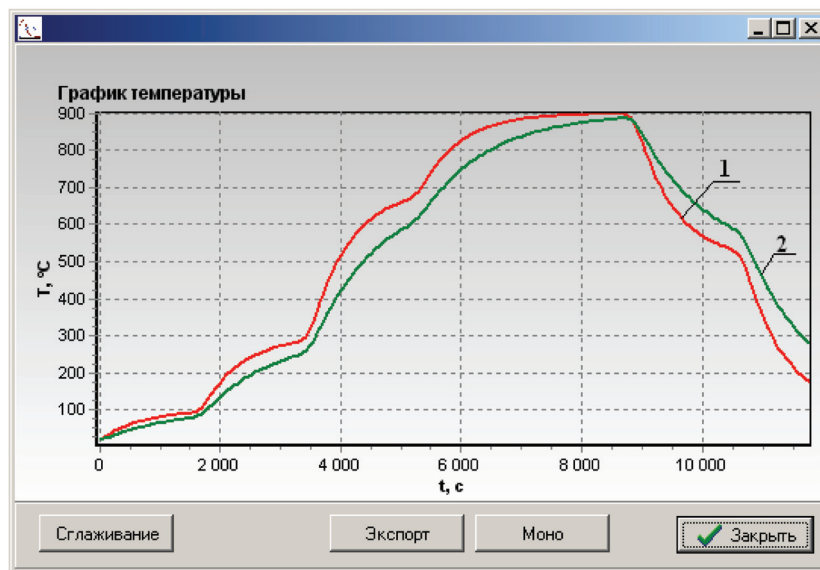


Рис. 10. Изменение температур в процессе термообработки в центре пластин с различной толщиной (плоскость XY, центральное сечение): 1 – толщина 10 мм; 2 – толщина 20 мм

времени 60 с в центральном сечении плоскости XY. Как видно из рисунков, температура в пластинах на момент времени 60 с распределяется неравномерно, наиболее нагретыми частями являются торцы пластины, в то время как поверхность и сердцевина имеют более низкую температуру. Также следует отметить, что пластина толщиной 10 мм успевает за 60 с прогреться на большую температуру, чем пластина толщиной 20 мм. Различия в нагреве пластин с разной толщиной видны также и на рис. 10, на котором показаны изменения температур в центре пластины на протяжении всего процесса термообработки.

Таким образом, полученные данные показывают возможности анализа температур в различных сечениях детали, следовательно, возможна визуализация на количественном уровне областей перегревов и недогревов в отдельных частях детали, что очень важно при рассмотрении деталей со сложной пространственной геометрией. Модули

нагрева и охлаждения «ПроТерм-1» могут быть использованы для разработки режимов термической обработки деталей в различных печах, а также для повышения качества принятия решений по выбору и оптимизации режимов термической обработки. Следует отметить, что дальнейшее развитие САЕ «ПроТерм-1» предполагает учет неоднородности температурного поля нагреваемой печной среды за счет пространственного расположения нагревателей.

Выводы

Описан математический аппарат для моделирования процесса термического нагрева и охлаждения деталей. Разработаны модули САЕ «ПроТерм-1» для расчета температурного поля деталей с развитой пространственной геометрией. Описан укрупненный алгоритм работы с «ПроТерм-1». С помощью САЕ «ПроТерм-1» проведено моделирование процесса нагрева чугунных стержней различного диаметра и плоских пластин различной толщины.

Литература

1. Чичко, А. Н. Комплекс программных средств «ПРОЛИТ» для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов / А. Н. Чичко, В. Ф. Соболев, С. Г. Лихоузов // Программные продукты и системы. 2002. № 4. С. 47–48.
2. Свидетельство о регистрации компьютерной программы «ПроЛит» № 037: А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов, В. Ф. Соболев, Ю. В. Яцкевич, О. И. Чичко, Д. М. Кукуй. Заявка № С20080028. 03.10.2008.
3. Чичко, А. Н. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме / А. Н. Чичко, С. Г. Лихоузов // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45. № 4. С. 110–114.