

УДК 519.688, 669.14.242

Возможности компьютерного моделирования процессов термической обработки.

Н.Н. Светушков

Аннотация. В работе описана разработанная программная среда, позволяющая проводить расчеты и контролировать точность вычислений при моделировании процессов термообработки изделий из материалов с меняющимися теплофизическими характеристиками (в условиях эвтектоидных превращений), основанная на новом подходе к решению нестационарных уравнений теплопроводности – методе «геометрических интегралов». Проведены расчеты и получены распределения температурных полей при термической обработке различных заготовок из жаропрочных никелевых сплавов в условиях их обдува воздушным потоком.

Ключевые слова: программные средства, визуализация, методы моделирования, термообработка, численные методы, уравнения в частных производных, интегральные уравнения, точность вычислений.

Введение

Важной проблемой при изготовлении ответственных деталей в авиационной промышленности (детали двигательных установок) является выбор рациональных режимов их термообработки, которые с одной стороны обеспечивали бы требуемую твердость рабочей поверхности, а с другой не приводили бы к формированию высоких термических и остаточных напряжений. Как известно, наилучшими эксплуатационными свойствами обладают детали, имеющие мелкодисперсную структуру материала, способствующую повышению износостойкости и жаропрочности, что обуславливается наиболее интенсивными режимами охлаждения. Определение условий термообработки, обеспечивающих высокую скорость охлаждения и не приводящих к короблению и растрескиванию заготовки, представляет сложную технологическую задачу, которую в последнее время пытаются решать методами математического моделирования.

К настоящему времени в мире накоплено значительное количество исследований, посвященных математическому моделированию физико-механических процессов при термообработке. Большинство работ в этой сфере принадлежит специалистам в области металловедения и термической обработки, поэтому в этих работах основное внимание уделено

вопросам структурообразования, в том числе и наноструктурирования, а вопросы, касающиеся определения внутренних термических напряжений при этих процессах, обходятся стороной или решаются на недостаточном уровне.

Для моделирования процессов термообработки в промышленности чаще всего используются широко известные коммерческие программные комплексы, такие как ANSYS, MATLAB, FLUENT и др., методы решения уравнений теплопроводности в которых основаны на различных модификациях метода конечных элементов (МКЭ). Стоимость этих программных средств довольно высока, а получаемые в результате расчета численные значения при решении сложных нелинейных задач могут не соответствовать реальным физическим процессам, т.к. оценить погрешность расчетов математическими методами довольно сложно. В случае, если получаемое приближение имеет осциллирующий характер обычно предлагается выбрать другой метод из имеющегося набора, который также не гарантирует получение адекватных результатов. Таким образом, имеющиеся на сегодняшний день алгоритмы и программные средства не позволяют на надлежащем уровне решать задачу моделирования сложных теплофизических процессов с требуемой инженерной точностью.

Цели и задачи

Основной целью работы явилось создание специализированной программной среды, дающей возможность проводить численные расчеты по термической обработке изделий из различных материалов в двумерном случае (включая осесимметричные задачи) с целью определения таких тепловых режимов, при которых достигаются по возможности максимальные скорости охлаждения, при которых не превышаются максимально допустимые термические напряжения. Для этого необходимо иметь данные о распределении температуры и тепловых полей по толщине обрабатываемого изделия с течением времени, что дает возможность рассчитать как скорости охлаждения для каждой элементарной области, так и тепловые напряжения в ней. С этой целью ставилась задача построения математической модели процесса, которая бы наилучшим образом соответствовала бы физическим условиям охлаждения изделия. Сравнение численных результатов по термической обработке с данными натурального эксперимента позволяет определить область применения разрабатываемой модели.

Дополнительной задачей являлась возможность получения надежных численных результатов, рассчитанных на основе нового алгоритма «геометрических интегралов», что в большой степени относится к вопросам применимости разработанных алгоритмических процедур для численного решения уравнений в частных производных.

Кластерный способ создания трехмерных моделей

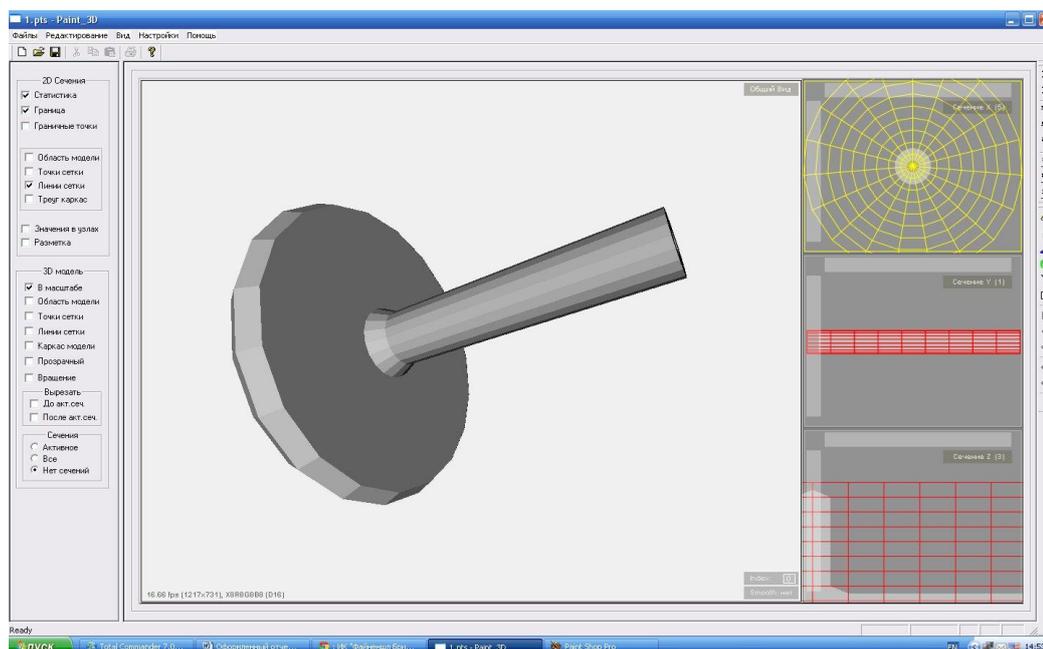
Задача моделирования процессов термической обработки сложных изделий может быть разделена на две независимые - геометрическую и расчетную. Первая требует разработки программной среды по созданию собственно трехмерной геометрической модели изделия,

описания его физических свойств и возможности задания различных условий внешнего теплового воздействия - граничных условий задачи. Вторая – применение специализированных алгоритмических процедур, предназначенных для расчета температурных полей.

Имеющиеся коммерческие программные средства трехмерного моделирования [напр. 1-2] или недостаточно функциональны, слишком специализированы или обладают перегруженным интерфейсом, что затрудняет их использование неподготовленными пользователями.

Разработанная программная среда геометрического моделирования позволяет простыми средствами создавать довольно сложные трехмерные объекты на основе принципов кластерного описания [3]. Классический способ построения трехмерной геометрической модели предполагает задание точек, описывающих определенную поверхность, при этом под моделью неявно подразумевается ограниченная этой поверхностью область. Однако, задание поверхности еще не определяет геометрическую модель. Реализация этого подхода с помощью программных средств (напр. Microsoft Direct X) подразумевает задание для каждой точки поверхности направление нормали, которое фактически определяет внешнюю для модели область. Модификация созданной таким образом модели требует задания многочисленных специализированных функций, оперирующие с точками поверхностями, что значительно усложняет интерфейс программных продуктов и накладывает на пользователя дополнительные требования по знанию их применения в каждом конкретном случае.

В отличие от классического подхода метод кластерного описания задает точки собственно объекта, а не его поверхности, при этом поверхность модели формируется автоматически (программным способом) путем объединения соответствующих поверхностей кластерных элементов. Таким образом, для создания простейших двумерных объектов – круга, эллипса, квадрата, прямоугольника и др. пользователю необходимо лишь указать (или отметить) выбранный кластерный элемент, а формирование модели будет выполнено соответствующими алгоритмическими процедурами.



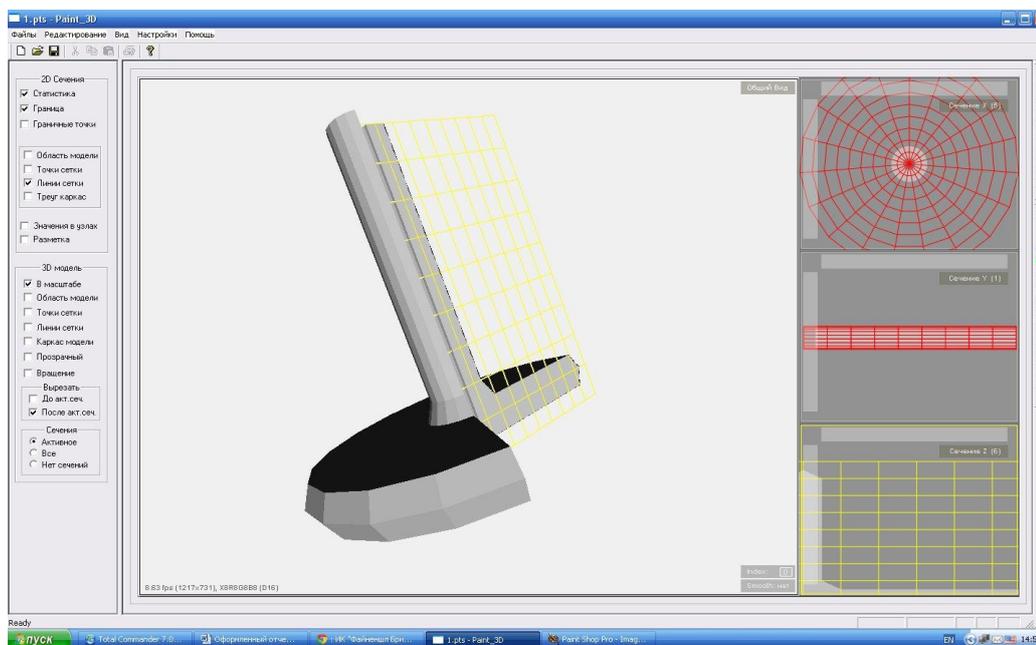


Рис.1. Трехмерная кластерная модель диска со стержнем

Кластерное описание позволяет унифицировать структуру геометрической модели, что упрощает модификацию или всего объекта или его части – для этого просто изменяются свойства элементарного кластера (тип соединяющей линии, величина базовых элементов и др.). Кроме этого, кластерная модель обладает важным свойством независимости своих элементов, что в случае сложной модели может значительно ускорить процесс отображения всего объекта на экране монитора – рендеринг каждого кластерного элемента может быть осуществлен в отдельном вычислительном потоке.

Разработанное программное обеспечение обладает простым, интуитивно понятным интерфейсом, причем изменение модели выполняется с помощью унифицированных средств корректировки элементарного кластера. На первом этапе происходит формирование сетки из кластерных точек – или прямоугольная сетка или осесимметричная, которые затем используются при создании трехмерного объекта.

На рисунке 1 приведен скриншот программного окна, в котором создана геометрическая модель - диск с приваренным стержнем.

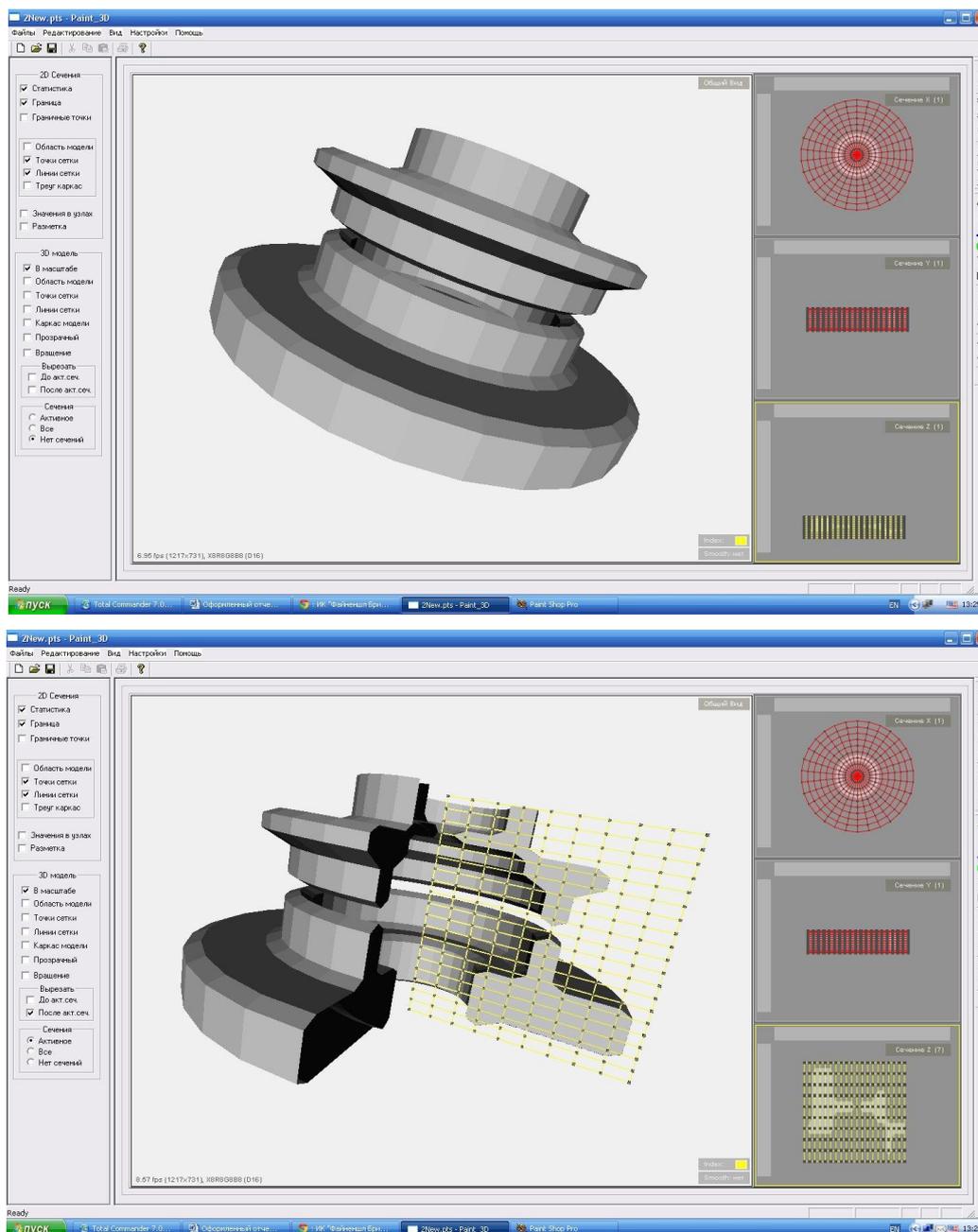


Рис.2. Трехмерная кластерная модель сложного составного изделия

На рисунке 2 представлена трехмерная модель более сложного объекта, которая может быть создана неподготовленным пользователем с помощью нескольких нажатий клавиши «мышь».

В левой части оконного приложения расположены опции вида модели: кластерные точки, прозрачность, общая область модели, сечения, возможности вращения и др. Центральная часть содержит собственно созданную модель, а правая часть включает три сечения, перпендикулярных соответствующим осям (каждое из сечений может быть отображено в центральной части основного окна).

Интерфейс разработанного программного комплекса, как видно на рисунках 1 и 2, имеет довольно понятную структуру, большую часть которой составляют опции вида. Для

редактирования модели используется контекстное меню, возникающее при наведении указателя «мышь» на соответствующий кластерный элемент. В программе предусмотрены возможности по перемещению базовых точек кластерного элемента в трех направлениях, копированию свойств другого элемента, а также его очистке.

Алгоритм расчета и визуализация результатов

В условиях термической обработки теплофизические свойства материала заготовки подвержены существенным изменениям в зависимости от распределения температуры. Теплопроводность никелевых сплавов может меняться в два раза, а теплоемкость – в десять раз.

Для моделирования процесса термообработки необходимо решать нелинейное уравнение теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial}{\partial t} u = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial}{\partial x} u + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial}{\partial y} u + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial}{\partial z} u + Q \quad (1)$$

где: $u = u(x, y, z, t)$ - температурное поле, $c\rho = c\rho(u)$ - произведение теплоемкости и плотности, зависящее от температуры, $k_x = k_x(u)$, $k_y = k_y(u)$ и $k_z = k_z(u)$ - коэффициенты теплопроводности, также зависящие от температуры, $Q = Q(x, y, z)$ - функция распределения тепловых источников, с граничными условиями второго рода – на границе заданы тепловые потоки. В условиях охлаждения изделия воздушным потоком граничные условия задаются согласно закону Фурье - тепловой поток пропорционален разности температур:

$$W_n = R(V)(T_c(t) - T_n(t)); \quad (2)$$

где $R(V)$ – коэффициент теплоотдачи, зависящий от скорости воздушного потока, $T_c(t)$ - температура воздушного потока, $T_n(t)$ - температура поверхности изделия.

В разработанном программном обеспечении для решения поставленной задачи используется метод «геометрических интегралов» [4-6], основанный на интегральном описании процесса теплопередачи.

Учитывая осесимметричную постановку, трехмерная задача сводится к двумерной, решение которой в программной среде инициируется пользователем путем выбора соответствующего пункта основного меню.

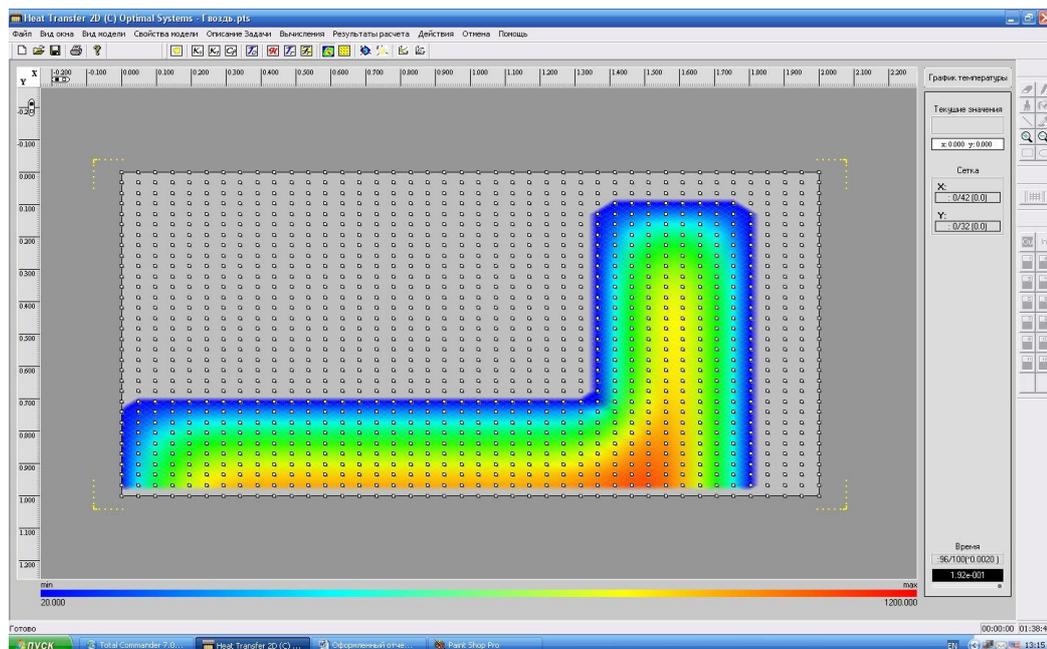


Рис.3. Характерный вид расчетного температурного поля по сечению при закалке сварного изделия из стержня с диском

Для визуализации расчетных данных выделено специальное окно, в котором отображается линейка с минимальной и максимальной температурой, номер текущего временного слоя и их общее количество, временной шаг, и собственно распределение температур. Пользователь имеет возможность увеличить или уменьшить изображение, а при перемещении курсора «мышь» в правой части показываются текущие координаты и температура в указанной точке.

На рисунке 4 представлены модельные расчеты по распределению температурного поля в сложном составном изделии в условиях поверхностной закалки. Проведенные расчеты демонстрируют работоспособность алгоритма для случая сложной геометрии образца и отсутствие осциллирующих составляющих в приближенном решении. Относительная точность расчетов задавалась равной 1%.

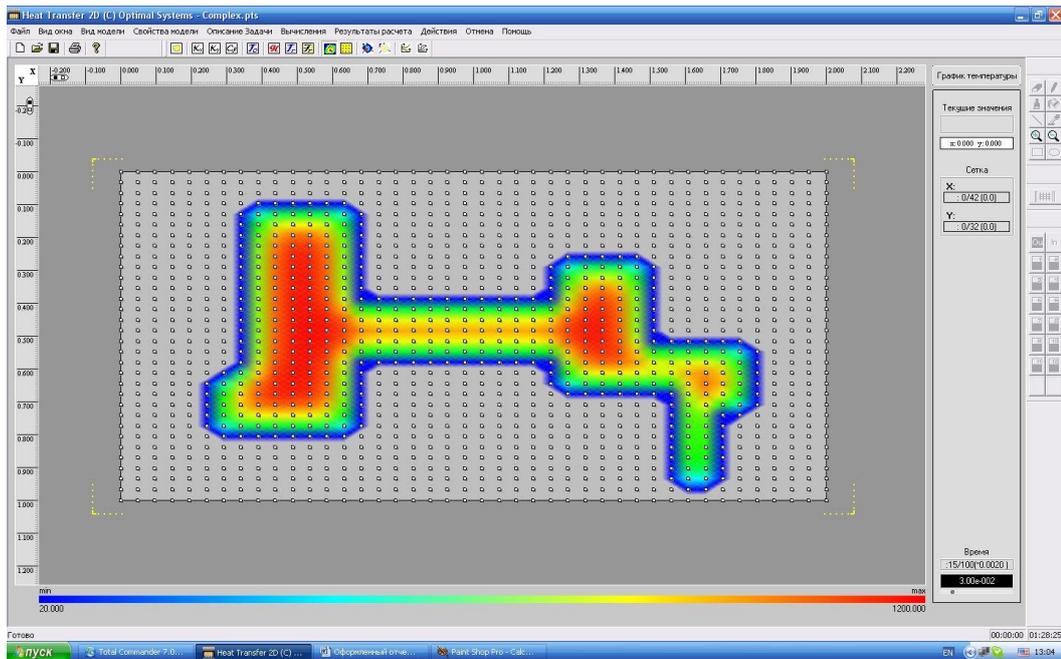


Рис.4. Характерный вид расчетного температурного поля по сечению при закалке сложного составного изделия

В разработанной программной среде имеется также возможность отображать средние температуры в кластерных точках и строить цветные трехмерные карты распределения температурных полей.

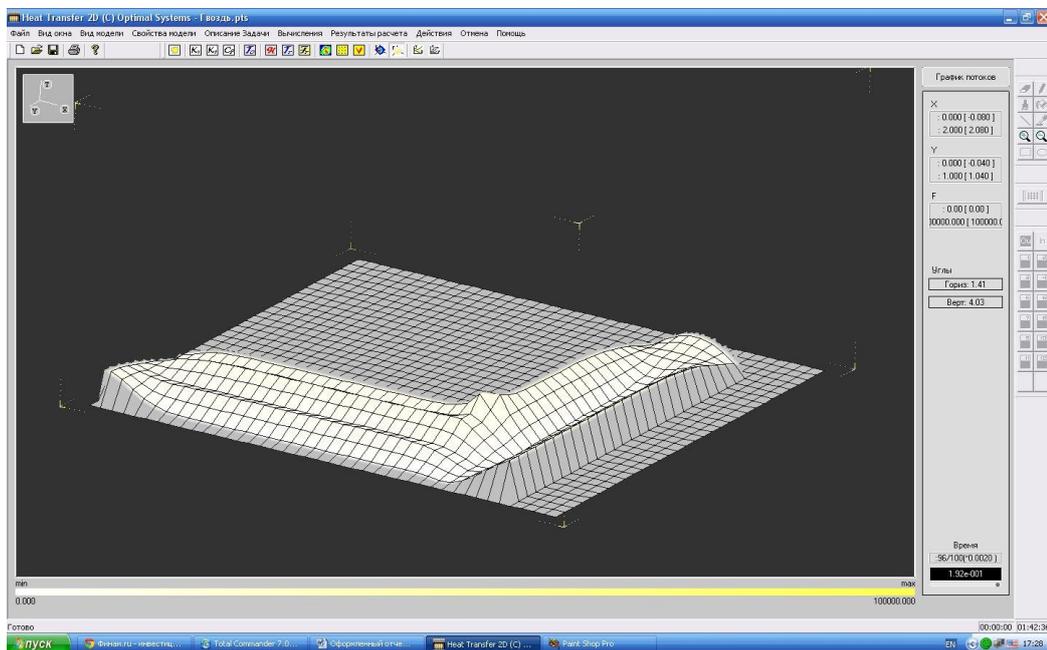


Рис.5. Характерный вид модуля градиента температур при закалке сварного изделия из стержня с диском

Для более информативного представления результатов расчета предусмотрено специальное окно, в котором выводятся на экран значения модуля градиента температуры, которые характеризуют величины термоупругих напряжений, т.е. если пользователем заданы модули упругости материала, то программная среда может явным образом рассчитать величины

термических напряжений. На рисунках 5 и 6 представлены результаты расчета модуля градиента температуры для выбранных моделей в виде трехмерных карт.

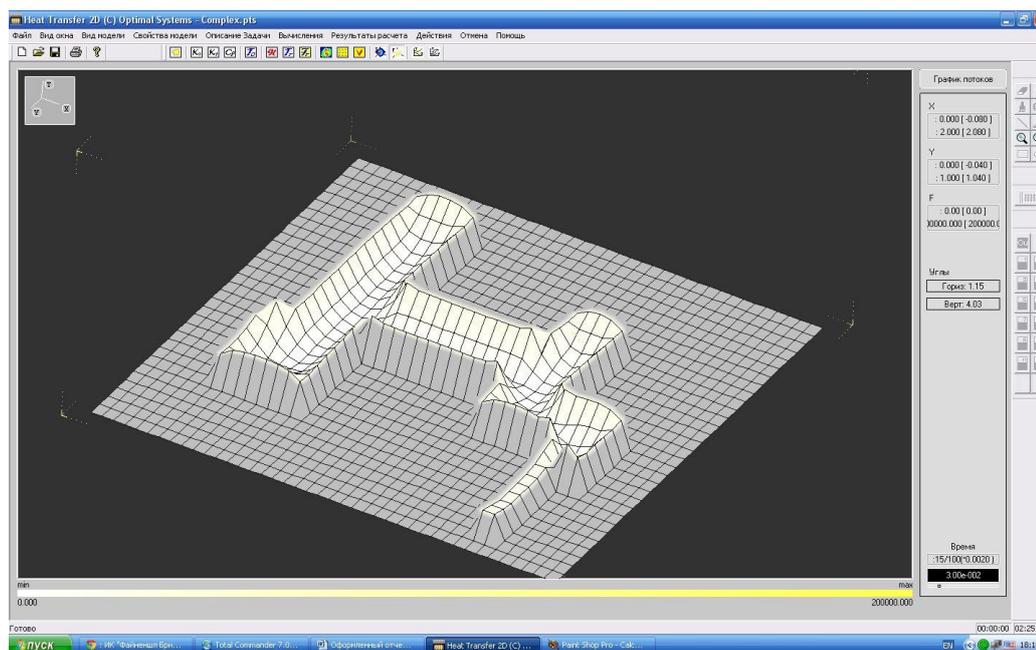


Рис.6. Характерный вид модуля градиента температур при закалке сложного составного изделия

Заключение

Разработанная программная среда – оконное приложение в среде Microsoft Windows – обладает достаточной функциональностью, позволяет формировать довольно сложные геометрические модели и проводить их исследование в условиях термообработки (закалки). Результаты расчетов показывают, что используемый алгоритм, основанный на методе «геометрических интегралов» не приводит к «нефизичным» результатам и демонстрирует довольно быструю сходимость до заданной точности. Поэтому данная программная система может быть использована для задач оптимизации и расчета допустимых термических напряжений в процессах термической обработки

Литература:

1. Потемкин А.Е. Твердотельное моделирование в системе КОМПАС-3D. – Издательство БХВ-Санкт-Петербург, 2004. 512 с.
2. T-FLEX CAD – Трехмерное моделирование. Руководство пользователя. - АО «Топ Системы» - Москва, 2005. 677с.
3. Светушков Н.Н. Кластерная модель геометрического описания сложных объектов. // САПР и графика. 2010. № 3. С. 86-88.
4. Светушков Н.Н. Моделирование процессов поверхностной закалки геометрически сложных изделий // Технология металлов. 2010. № 3. С. 23-29.
5. Светушков Н.Н, Третьякова О.Н. Проблемы численного моделирования теплообмена в геометрически сложных объектах // Труды пятой российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-5:

Сб. М. 2010. С. 97-100.

6. Svetushkov N. Geometric integral methods in simulation of thermal processes. // 4th International Conference on Thermal Process Modeling and Computer Simulation. Shanghai, CHINA. 28 May-3 June, 2010, P. 60-61.

Сведения об авторах

Светушков Николай Николаевич, старший научный сотрудник Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н. Тел.: (499) 158-47-42, 8-916-306-37-80; e-mail: svt.n.n@mail.ru