

2. Гергель В.П. Высокопроизводительные вычисления многоядерных процессорных систем. — М.: Издательство ННГУ, 2010. — С. 421

3. Теория и практика цифровой обработки сигналов. URL: <http://www.dsplib.ru/index.html> (Дата обращения: 17.09.2013).

4. Cooley, James W.; Tukey, John W. "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series". *Math. Comput.* 19: 297–301

5. Сайт компании Microsoft. <http://msdn.microsoft.com/ru-ru/> (Дата обращения: 17.09.2013)

6. Аврамчук В. С. Определение наличия гармонических составляющих и их частот в дискретных сигналах на основе автокорреляционной функции // *Известия Томского политехнического университета*. - 2012 - Т. 321 –№. 5 – С. 113–116.

7. Аврамчук В.С., Лунева Е.Е., Карабин В.Л. Визуализация частотно-временной корреляционной функции на основе технологии OpenGL // *Сис-*

темы управления и информационные технологии, №1.1(51), 2013. – С. 110–113.

8. Лунева Е.Е., Аврамчук В.С. Анализ путей повышения эффективности расчетов частотно-временной корреляционной функции // *Известия Томского политехнического университета*. – 2013. – Т. 322 – № 5. – С. 33–36.

9. Лунева Е.Е., Аврамчук В.С. Технологии параллельных вычислений на многопроцессорных системах в задачах корреляционного анализа // *Системы управления и информационные технологии*, №3.1(49), 2012. – С. 156–159.

10. Аврамчук В.С., Лунева Е.Е., Черемнов А.Г. Способы повышения эффективности вычисления быстрого преобразования Фурье//*Интернет-журнал «Науковедение»*. 2013 №3 [Электронный ресурс].-М. 2013. – Режим доступа: <http://naukovedenie.ru/PDF/16tvn313.pdf>, свободный – Загл. с экрана.

CONTINUOUS CASTING SIMULATION IN COMSOL MULTIPHYSICS SOFTWARE PACKAGE

Cherkashina Y.A.

Scientific advisor: Ass. Prof. A.S. Ogorodnikov
Tomsk Polytechnic University
Lenina Avenue, 30, 634050, Tomsk, Russia
E-mail: cherr999y@mail.ru

Modeling is an essential and inseparable part of scientific work, and many scientific disciplines have their own ideas about specific types of modeling. A scientific model can provide a way to understand elements easily which have been broken down to a simpler form.

The COMSOL Multiphysics simulation environment facilitates all the steps in the modeling process – defining geometry, meshing, specifying physics, solving, and then visualizing results. It also serves as a platform for the application specific modules.

In this work the continuous casting process is simulated using two stationary modes of COMSOL Multiphysics: General Heat Transfer and Weakly Compressible Navier-Stokes.

This work simulates the process of continuous casting of a metal rod from a melted state. To optimize the casting process in terms of casting rate and cooling, it is helpful to model the thermal and fluid dynamic aspects of the process. To get accurate results, you must model the melt flow field in combination with the heat transfer and phase change. The model includes the phase transition from melt to solid, both in terms of latent heat and the varying physical properties.

The model is a two-dimensional axisymmetric model in the rz-plane. Figure 1 shows the dimensions of the 2D geometry. The underlying reference model was originally developed by J. Fjellstedt.

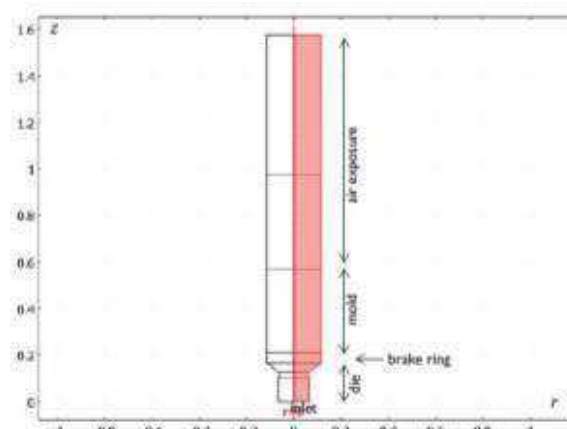


Fig. 1. 2D axisymmetric model of the casting process

As the melt cools down in the mold it solidifies. The phase transition releases latent heat. Furthermore, for metal alloys, the transition is often spread out over a temperature range. As the material solidifies, the material properties change considerably. Finally, the model also includes the “mushy” zone—a mixture of solid and melted material that occurs due to the rather broad transition temperature of the alloy and the solidification kinetics.

The process operates at steady state, because it is a continuous process. The heat transport is described by the equation:

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) = Q - (\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T) \quad ,$$

where k , C_p , and Q denote thermal conductivity, specific heat, and heating power per unit volume, respectively.

As the melt cools down in the mold, it solidifies. During the phase transition, a significant amount of latent heat is released. The total amount of heat released per unit mass of alloy during the transition is given by the change in enthalpy, ΔH . In addition, the specific heat capacity, C_p , also changes considerably during the transition. As opposed to pure metals, an alloy generally undergoes a broad temperature transition zone, over several kelvin, in which a mixture of both solid and molten material co-exist in a “mushy” zone. To account for the latent heat related to the phase transition, replace C_p in the heat equation with $(C_p + \delta\Delta H)$, where ΔH is the latent heat of the transition, and δ is a Gaussian curve given by

$$\delta = \frac{\exp\left(-\frac{(T-T_m)^2}{(\Delta T)^2}\right)}{\Delta T \sqrt{\pi}}.$$

Here T_m is the melting point and ΔT denotes the half-width of the curve, in this case set to 5 K, representing half the transition temperature span.

The change in specific heat can be approximated by:

$$\Delta C_p = \frac{\Delta H \cdot H}{T_m}$$

Here H is the smooth Heaviside step function.

Here the laminar flow is simulated using the Weakly Compressible Navier-Stokes application mode. The application mode describes the fluid velocity, \mathbf{u} , and the pressure, p , according to the Navier-Stokes equations:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \left(\frac{2\eta}{3} - k\right)(\nabla \mathbf{u})\mathbf{I}] + \mathbf{F},$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

where ρ is the density (in this case constant), η is the viscosity, and κ is the dilatational viscosity (here assumed to be zero). The source term, \mathbf{F} , is in this model used to dampen the velocity at the phase-change interface so that it becomes that of the solidified phase after the transition.

The source term follows from the equation

$$\mathbf{F} = \frac{(1-B)^2}{B^3 + \varepsilon} A_{\text{mush}} (\mathbf{u} - \mathbf{u}_{\text{cast}}),$$

where B is the volume fraction of the liquid phase; A_{mush} and ε represent arbitrary constants, (A_{mush} should be large and ε small to produce a proper damping); and \mathbf{u}_{cast} is the velocity of the cast rod.

The fraction of liquid phase, B , is given by

$$B = \begin{cases} 1, & (T > T_m + \Delta T), \\ \frac{(T - T_m + \Delta T)}{2\Delta T}, & (T_m - \Delta T) \leq T \leq (T_m + \Delta T), \\ 0, & (T < T_m - \Delta T), \end{cases}$$

Table 1 reviews the material properties in this model.

Table 1. Material properties

PROPERTY	MELT	SOLID
ρ (kg/m ³)	8500	8500
C_p (J/(mol·K))	530	380
k (W/(m·K))	200	200
η (Ns/m ²)	0.0434	-

Furthermore, the melting temperature, T_m , and enthalpy, ΔH , are set to 1356 K and 205 kJ/(kg·K), respectively.

The model uses the parametric solver in combination with adaptive meshing to solve the problem efficiently.

The plots in Figure 2 and Figure 3 display the temperature and phase distributions, showing that the melt cools down and solidifies in the mold region. Interestingly, the transition zone stretches out towards the center of the rod because of poorer cooling in that area.

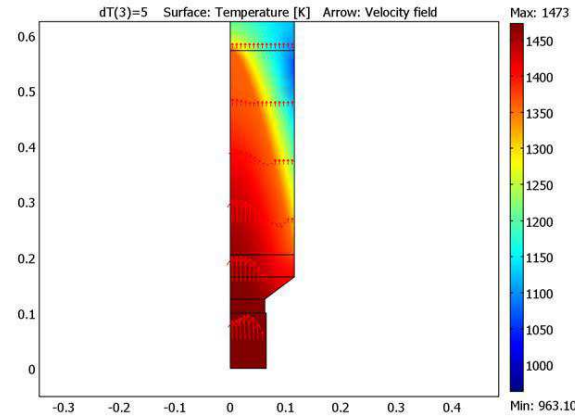


Fig. 2. Temperature distribution in the lower part of the cast at a casting rate of 1.6 mm/s

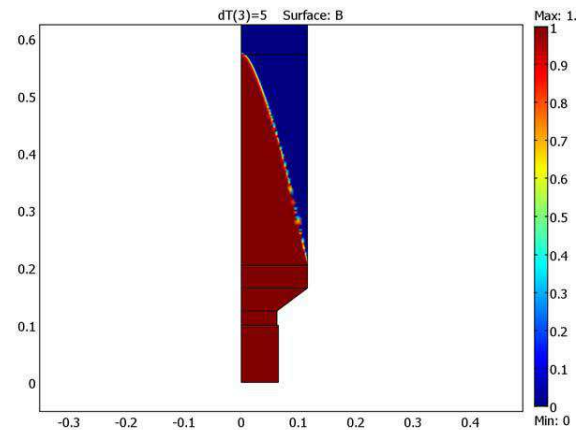


Fig. 3. Fraction of liquid phase in the lower part of the cast at a casting rate of 1.6 mm/s

With the modeled casting rate, the rod is fully solidified before leaving the mold. This means that the process engineers can increase the casting rate without running into problems, thus increasing the production rate.

The phase transition occurs in a very narrow zone although the model utilizes a transition half width, ΔT , of 5 K. In reality it would be even more distinct if a pure metal were being cast but somewhat broader if the cast material were an alloy with a wider ΔT .

The model is solved using a built-in adaptive meshing technique. This is necessary because the transition zone—that is, the region where the phase

change occurs—requires a fine discretization. The adaptive meshing technique allows for fast and accurate calculations even if the transition width is brought down to a low value, such as for pure metals.

References

1. COMSOL Multiphysics User's Guide, Version 3.3.
2. V.R.Voller, C.Prakash, Int.J.Heat Mass Transfer, vol. 30, pp.1709-1719, 1987.
3. Официальный сайт ComsolMultiphysics. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.comsol.com/>, свободный.

МЕТОДЫ ОПИСАНИЯ БЛОК-СХЕМ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ

Динь Ван Тай, Нгуен Ань Ту
Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30
E-mail: dinhvantai88@gmail.com

Введение

Анализ конструктивных схем современных технических систем показывает, что они, как объект исследования, надежности представляют собой сложные последовательно-параллельные структуры. Основная проблема создания имитационной модели на ЭВМ заключается в сложности описания взаимодействий элементов системы на языке, понятном ЭВМ.

Основные виды соединения элементов [1]

1. Последовательное соединение:

При отказе любого элемента отказывает вся система; наработка до отказа системы равна наработке до отказа того элемента, у которого она оказалась минимальной:

$$T_c = \min(T_j), \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где n — число элементов системы.

2. Параллельное нагруженное («горячее») соединение:

Система сохраняет работоспособность, пока работоспособен хотя бы один элемент из k включенных в работу; наработка до отказа системы равна максимальному значению из значений наработки до отказа элементов:

$$T_c = \max(T_j), \quad j = 1, 2, \dots, k,$$

где k — число элементов системы.

3. Параллельное ненагруженное («холодное») соединение:

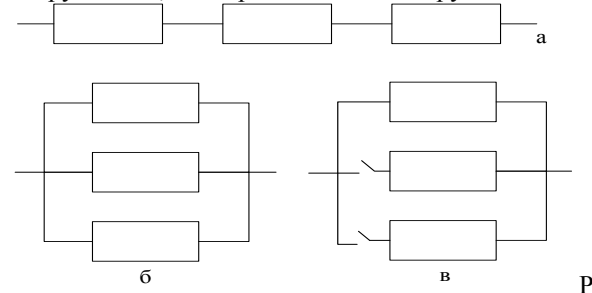
Резервный элемент включается в работу только при отказе основного элемента; наработка до отказа системы равна сумме наработок до отказа элементов.

$$T_c = \sum_{j=1}^m T_j,$$

где m — число элементов системы.

На рисунке 1 приведены обозначения трех видов соединений элементов для расчета надежно-

сти: а — последовательное; б — параллельное нагруженное; в — параллельное ненагруженное.



ис. 1. Виды соединений элементов: а — последовательное; б — параллельное нагруженное; в — параллельное ненагруженное

Способы описания блок-схем надежности

Структура системы записывается по заданным правилам в текстовом файле, который в дальнейшем можно использовать для создания специализированного программного обеспечения по расчёту показателей надёжности. В данной работе используется пакет Matlab.

1. Для параллельно-последовательной системы [2].

Первый столбец — порядковые номера элементов, входящих в состав системы.

Второй столбец — цифровой код закона распределения времени до отказа каждого элемента:

- «1» соответствует нормальному закону распределения;
- «2» соответствует закону распределения Вейбулла;
- «3» соответствует экспоненциальному закону распределения;
- «4» соответствует логнормальному закону распределения.

В третьем и четвертом столбцах находятся соответственно первый и второй коэффициенты