



There is analyzed the efficiency of using of different mathematical models (material behavior) at calculation of the thermo-stressed state of steel ingots and slugs. There is based the choice of model of the material viscoelastic behavior at calculations of solidification and heating of incompletely solidified ingots.

И. А. ТРУСОВА, БНТУ

УДК 621.746

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ И ОХЛАЖДЕНИИ КРУПНОТОННАЖНЫХ СЛИТКОВ

Постоянно возрастающие требования к качеству металлопродукции в современной металлургии обусловили необходимость изучения тепловых и термомеханических явлений на стадии затвердевания и охлаждения слитков и заготовок, получаемых как путем разливки в изложницы, так и методом непрерывной разливки. В работе [1] отмечено, что сложность решения таких задач определяется тем, что формирование стальных слитков и заготовок происходит в широком диапазоне температур (от 1400–1600 до 20–40°C) и сопровождается при этом рядом сложных взаимосвязанных явлений (фазовые и структурные превращения, изменение теплофизических и физико-механических свойств материалов от температуры и т. д.). Ситуация еще более усугубляется тем, что надежность полученных результатов решения такой сложной задачи, как расчет термических напряжений и деформаций, в немалой степени зависит также от выбора исходной математической модели формирования термических напряжений, причем, как указано в работах [2, 3], в данной области к настоящему времени не существует устоявшегося единого подхода. В связи с изложенным представляет практический интерес сравнительный анализ используемых математических моделей формирования термических напряжений и деформаций в процессах кристаллизации стальных слитков и заготовок.

В работе [2] приведено сравнение наиболее распространенных подходов к решению задач термонапряженного состояния на примере затвердевания плоского слитка в изложнице. Для расчета температурных полей использовали традиционную математическую модель теплообмена затвердевающего плоского слитка в изложнице, при этом после возникновения газового зазора между слитком и изложницей считали, что теплообмен происходит только излучением, т. е. пренебрегали контактной проводимостью и конвективным теплообменом, а на поверхности изложницы осуществляется сложный лучисто-конвективный тепло-

обмен. В качестве исходных моделей при расчете термонапряженного состояния рассмотрены модели термоупругого, упругопластического и вязкоупругого поведения материала. При построении моделей учтено, что формирование напряженно-деформированного состояния осуществляется в условиях сложного нагружения (изменение толщины твердой корочки во времени, сложный характер теплообмена и т. д.). Задача решалась в приращениях напряжений и деформаций для поэтапных изменений нагружения:

$$\Delta\sigma_y''(x) = \Delta\sigma_z''(x), \quad (1)$$

$$\Delta\sigma_x'' = \Delta\sigma_y'' = \Delta\sigma_z'' = \Delta\sigma_{yz}'' = 0. \quad (2)$$

Уравнения совместности

$$\frac{\partial^2 \Delta\epsilon_y''}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 \Delta\epsilon_z''}{\partial x^2} = 0. \quad (3)$$

Соотношения, связывающие полные приращения деформаций, а также их упругие $\Delta\epsilon^l$, пластические $\Delta\epsilon^p$, вязкие $\Delta\epsilon^c$ и термические $\Delta\epsilon^T$ компоненты с приращениями напряжений, имеют вид

$$\Delta\epsilon_x = \Delta\epsilon_x^l + \Delta\epsilon_x^p + \Delta\epsilon_x^c + \Delta\epsilon^T, \quad (4)$$

$$\Delta\epsilon_z = \Delta\epsilon_y = \Delta\epsilon_y^l + \Delta\epsilon_y^p + \Delta\epsilon_y^c + \Delta\epsilon^T, \quad (5)$$

$$\Delta\epsilon_x^l = -\frac{2\mu}{E} \Delta\sigma_y + \left(\frac{\mu\sigma_y}{E^2} \frac{dE}{dT} - \frac{\sigma_y}{E} \frac{d\mu}{dT} \right) \Delta T,$$

$$\Delta\epsilon_y^l = \frac{1-\mu}{E} \Delta\sigma_{yy} - \left(\frac{(1-\mu)\sigma_{yy}}{E^2} \frac{dE}{dT} - \frac{\sigma_{yy}}{E} \frac{d\mu}{dT} \right) \Delta T,$$

$$\Delta\epsilon_x^p = (F_\sigma(\sigma_y, T) \Delta\sigma_{yy} + F_T(\sigma_y, T) \Delta T) S_x,$$

$$\Delta\epsilon_y^p = (F_\sigma(\sigma_y, T) \Delta\sigma_y + F_T(\sigma_y, T) \Delta T) S_y,$$

$$\Delta\epsilon_x^c = \nu_x \Delta\tau, \quad \Delta\epsilon_y^c = \nu_x \Delta\tau,$$

$$\Delta \varepsilon^T = \alpha_T(T) \Delta T, \quad F_\sigma = \frac{3}{2\sigma_i} \left(\frac{1}{E_k} - \frac{1}{E} \right),$$

$$F_T = \frac{3}{2\sigma_i} \left(\beta + \frac{\sigma_i}{E} \frac{dE}{dT} \right), \quad \sigma_i = \sqrt{(\sigma_y^2 + \sigma_z^2) / 2},$$

$$S_x = -\frac{2}{3} \sigma_y, \quad S_y = \frac{\sigma_y}{3}.$$

С использованием представленной математической модели (1)–(5) приведены расчеты термонапряженного состояния затвердевающего слитка, при этом, помимо сравнения различных подходов к решению исходной задачи (упругая, упруго-пластическая и вязкоупругая), рассматривали два варианта теории ползучести, а именно теорию Максвелла и теорию Нортонa (рис. 1). Из рисунка видно, что качественная картина распределения термических напряжений по сечению твердой корочки для всех исследуемых вариантов аналогична, вблизи охлаждаемой поверхности наблюдаются растягивающие напряжения, в середине затвердевшей корочки – сжимающие, вблизи двухфазной зоны – растягивающие. Здесь следует отметить, что термонапряженное состояние рассматривалось в фиксированный момент времени и применительно к конкретным размерам слитка (слиток толщиной 0,36 м, $\tau = 170$ с). В преды-

дущие или последующие моменты времени возможна обратная картина распределения напряжений. Но вместе с тем, касательно конкретного времени ($\tau = 170$ с) имеется существенное различие в величинах напряжений, рассчитанных с использованием моделей различного поведения материала. Максимальные напряжения (как растягивающие, так и сжимающие) наблюдаются в случае расчета по упругой и упругопластической моделям, причем вблизи двухфазной зоны они имеют практически одну и ту же величину. При расчете по вязкоупругой модели значения термических напряжений в 2–3 раза меньше, чем в случае упругого и упругопластического поведения материала и близки по своему значению как в случае использования теории Максвелла, так и теории Нортонa.

Таким образом, очевидно, что учет вязких эффектов значительно снижает термические напряжения, что отмечается авторами в работах [2–5]. При этом время релаксации для конкретной марки стали (сталь 45) рассчитывали по выражению

$$\tau(T) = 9 \cdot 10^8 \exp(-0,0144T).$$

В работе [1] приведено выражение для определения так называемого условного времени релаксации

$$\tau = \left(\frac{G}{\eta} - \frac{G\dot{T}}{G} \right),$$

которое состоит из суммы двух различных физических явлений – вязкого течения материала под нагрузкой при повышенных температурах (ползучесть) и влияния нелинейности упругих характеристик материала (модуля сдвига), связанного с локальными значениями скорости охлаждения.

В работах [3, 6] представлены результаты исследования термонапряженного состояния слитка при прохождении им совмещенного теплотехнологического процесса «затвердевание в изложнице – охлаждение на воздухе – нагрев в колодце». При этом для условий тепловой обработки бьюмингового слитка сечением 0,736x0,655 м (двумерная задача теплопроводности) были рассмотрены пять моделей поведения материала: упругая, упругопластическая, вязкоупругая (модель Максвелла), вязкоупругая (модель Нортонa), вязкоупругопластическая. Кроме того, исследовали поля термических напряжений в наиболее характерные моменты времени: в период затвердевания слитка перед смыканием корочек, момент полного затвердевания, в период пребывания слитка на воздухе, а также, что исключительно важно, в момент затвердевания слитка в случае нахождения его в изложнице и в случае его пребывания в нагревательном колодце (при посадке неполностью затвердевших слитков). При этом было установлено, что и в случае затверде-

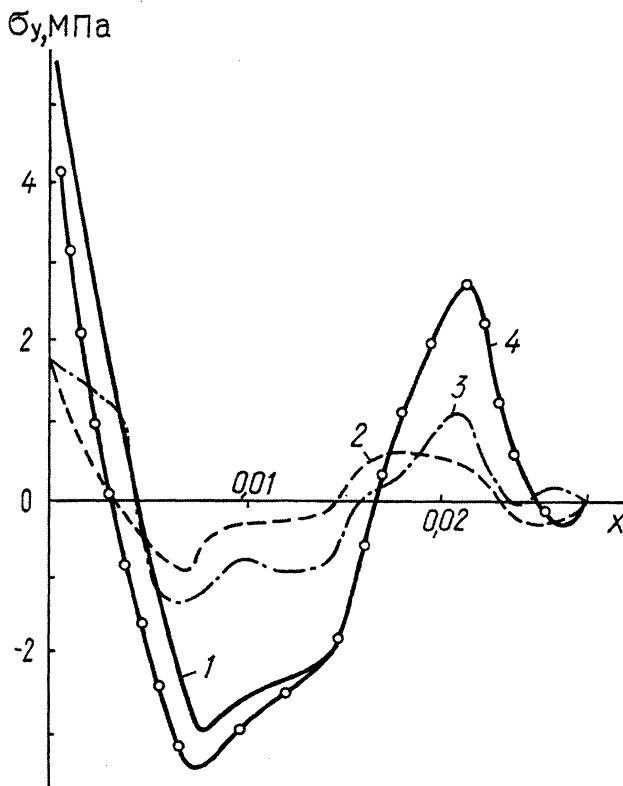


Рис. 1. Распределение напряжений по толщине корочки в момент времени $\tau = 170$ с: — идеальная упругая модель; - - - вязкоупругая модель (вариант Максвелла); - · - · - вязкоупругая модель (вариант Нортонa); ○-○-○ - упругопластическая модель

вания прямоугольных в поперечном сечении слитков решения, полученные в упругом и упруго-пластическом приближениях, весьма близки друг к другу (рис. 2, 3). Кроме того, во всех случаях учет пластических эффектов не уточняет вязкоупругую модель: результаты расчетов, полученные на вязкоупругой и вязкоупругопластической моделях, практически совпадают.

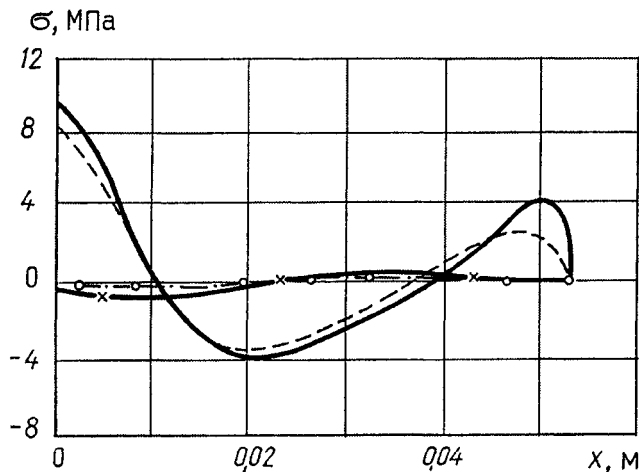


Рис. 2. Напряжения в корочке затвердевающего слитка ($\tau = 2060$ с): — упругая модель; - - - упругопластическая модель; - · - · - вязкоупругая модель (модель Максвелла); - x - x - вязкоупругая модель (модель Нортона); - o - o - вязкоупругопластическая модель

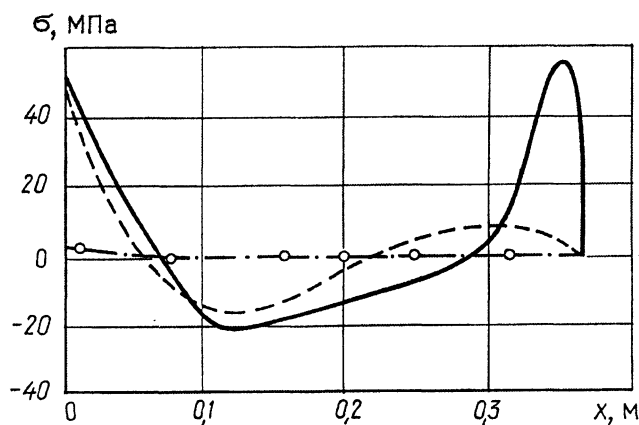


Рис. 3. Напряжения в затвердевающем слитке перед смыканием корочек ($\tau = 8400$ с): — упругая модель; - - - упругопластическая модель; - · - · - вязкоупругая модель; - o - o - вязкоупругопластическая модель

На рис. 4 приведено распределение термических напряжений в момент полного затвердевания слитка, при этом рассматривали, как отмечено выше, два варианта: 1) момент полного затвердевания происходит при нахождении слитка в изложнице; 2) полное затвердевание слитка происходит после посада его с жидкой сердцевиной в ячейку нагревательного колодца. Здесь очевидно, что при нагреве полностью затвердевших

слитков максимальные растягивающие напряжения в момент смыкания корочек существенно ниже, чем в слитке, находящемся в этот момент в изложнице. Это можно объяснить более высокой температурой слитка (его поверхности) в процессе нагрева в колодце, что наряду с выравниванием температурного перепада приводит к более выраженному эффекту релаксации. Вместе с тем очевидно, что величина термических напряжений (максимальных) будет зависеть от величины жидкой сердцевины в момент посада слитка в нагревательный колодец и от теплового нагружения, т. е. температурно-теплового режима. Это обстоятельство приводит к необходимости при организации режимов горячего посада (в том числе и неполностью затвердевших слитков) в каждом конкретном случае проведения расчетов термонапряженного состояния слитка. Исследования позволили сделать важный вывод: при решении термодформационной задачи в случае нагрева слитков с горячего посада целесообразно использовать вязкоупругую, с холодного посада — упругопластическую модель.

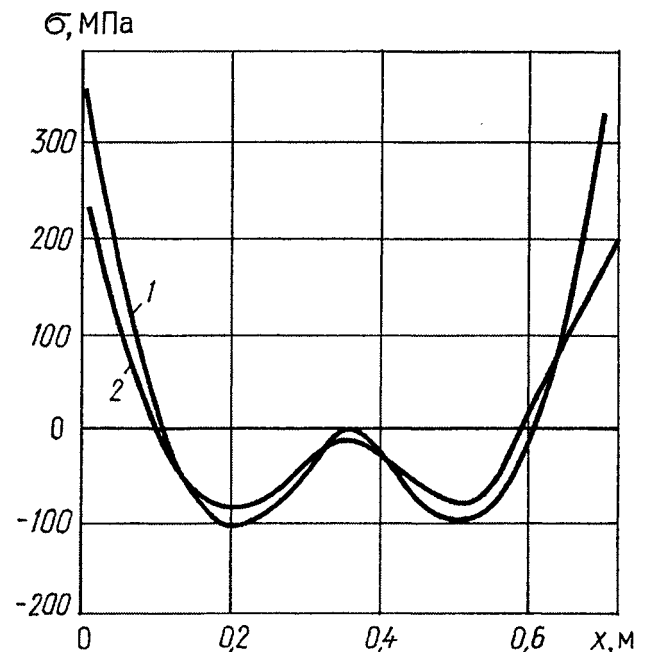


Рис. 4. Напряжения в слитке в момент полного затвердевания ($\tau = 8400$ с), вязкоупругая модель: 1 — смыкание корочек в изложнице; 2 — смыкание корочек в колодце при нагреве неполностью затвердевшего слитка

Таким образом, организация режимов горячего посада слитков с повышенным теплосодержанием в нагревательные устройства, т. е. с неполностью затвердевшей сердцевиной, позволяет наряду с экономией топливно-энергетических ресурсов повысить качество выпускаемой металлопродукции за счет снижения возникающих термических напряжений и, как следствие, уменьшения дефектов типа горячих трещин.

Литература

1. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Маточкин В.А. Расчет температур, напряжений и деформаций при производстве непрерывнолитых заготовок. Сообщение 1. Решение связанных задач нестационарной термовязкоупругости для затвердевающих заготовок в ходе непрерывного литья // Литье и металлургия. 2002. №3. С. 53–59.

2. Дымова Л.Г., Севастьянов П.В., Тимошпольский В.И. Сравнительный анализ математических моделей формирования термических напряжений и деформаций в затвердевающей слитке // Инж.-физ. журн. 1991. Т.60, №1. С. 115–120.

3. Самойлович Ю.А., Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Филиппов В.В. Стальной слиток. В 3-х т.

Т.2. Затвердевание и охлаждение / Под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2000.

4. Самойлович Ю.А., Кабаков З.К. Учет эффекта релаксации при определении термических напряжений в отливке, затвердевающей в интервале температур / Сб. науч. тр. ВНИИМТ. Горение, теплообмен и нагрев металла. 1973. Вып.24. С. 100–113.

5. Самойлович Ю.А. Микрокомпьютер в решении задач кристаллизации слитка. М.: Металлургия, 1988.

6. Математическое моделирование тепловых и термомеханических явлений в современном технологическом процессе затвердевание в изложнице – нагрев / В.И. Тимошпольский, П.В. Севастьянов, В.А. Пумпур и др. // Вестн АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1989. №1. С. 62–66.



ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Цены на полуфабрикаты цветных металлов на рынке Великобритании

	14 марта 2003 г.		14 марта 2003 г.
Алюминий, франко-предприятие,		Пруток BS 2874, 2872,	
партии в 1 т (ф. ст. за т)		22–27 мм	211,0
Тонкий лист стандартный,		Медь (ф. ст. за т)²⁾	
сорт 1050А, 0,9 мм и более	1420–1450	Прутковая заготовка	
Тонкий лист стандартный,		в бунтах 8 мм	1028,22
сорт 5251, 0,9 мм и более	1520–1550	Тонкий лист холоднокатаный	
Плиты, сорт 5083, 25 мм	1900–2000	Базисная цена	1895,0
Плиты, сорт 6082, 25 мм	2300–2450	1200x600x1 мм	2316,0
Экструдированные изделия,		1200x600x1,2 мм	2276,0
стандартные, сорт 6063 ¹⁾	2150–2250	Лента холоднокатаная	
Бериллиевая бронза,		в рулонах, партии в 1 т	
базисная цена, партии		150x0,2 мм	2639,0
в 150–250 кг, BS 2870		150x0,8 мм	2404,5
СВ 101 (ф. ст. за кг)		Проволока горячекатаная	
Лента 0,38x76,2 мм	24,73	1,6–4,0 мм, партии в 1 т	1599,97
Пруток 25,4 мм и более	24,93	Трубы (ф. ст. за 100 кг) ²⁾	
Латунь (ф. ст. за т)²⁾		Базисная цена	129,85
Лента		25,4 мм (наружный диаметр),	
64/36, базисная цена	1662,0	16 калибр; партии от 500	
Тонкий лист, партии в 1 т		до 1000 кг	301,67
1200x600x1 мм	2248,0	Фосфорная бронза	
1200x600x0,7 мм	2273,0	(ф. ст. за 100 кг) ²⁾	
Лента, партии в 1 т		Прутки BS1400 PB1	326,0
150x1 мм	2152,0		
150x0,5 мм	2254,0		
Проволока (63/37)			
(ф. ст. за 100 кг) ²⁾ 3–3,99 мм	240,0		
4–4,99 мм	239,0		
5–5,99 мм	236,5		
6 мм и более	236,0		

¹⁾ При поставке партиями в 500 кг.

²⁾ С доставкой покупателю.