

УДК 621.785.1.011-97-047.5

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ЗАГОТОВКЕ

*Крючков О.Б., к.т.н., доцент кафедры технологии материалов (bardb@mail.ru)*

Волгоградский государственный технический университет  
(400005, Россия, Волгоград, пр. Ленина, 28)

**Аннотация.** При нагреве заготовок в печи под термическую обработку и обработку металлов давлением необходимо максимально быстро нагреть поверхность заготовки при минимальном перепаде температуры по ее сечению, который зависит от начальной температуры поверхности и центра заготовки, начальной температуры печи и скорости ее подъема. Перепад температуры по сечению заготовки способствует возникновению температурных напряжений в ней. В процессе нагрева заготовок температурные напряжения не должны превышать допустимых значений напряжений в упругой области, зависящих от толщины нагреваемого слоя металла и его химического состава. Таким образом, для получения качественной заготовки при максимальной производительности печи необходимо использовать оптимальный режим нагрева, отработку которого во избежание больших материальных затрат можно осуществлять с помощью физического моделирования. При физическом моделировании объект изучения – реальный образец заменяется моделью, нагрев которой осуществляется в печи-модели. Для проведения физического моделирования необходимо выбрать материал модели, выбрать или изготовить печь-модель, рассчитать линейный масштаб модели и изготовить ее, рассчитать температурный и временной масштабы моделирования, с учетом которых провести нагрев модели в печи-модели с замером температурного поля модели с дальнейшим пересчетом температуры на реальный образец. В работе предложена методика расчета температурного поля в промышленной заготовке из стали ШХ15, нагреваемой под термическую обработку, а именно – смягчающий отжиг в электрическом колодце с использованием физического моделирования, проводимого в лабораторной камерной электрической печи с использованием модели. Обоснован выбор материала для изготовления модели, а также приведены методики расчета линейного, температурного и временного масштабов моделирования. На основании экспериментальных замеров температуры на поверхности и в центре модели при ее нагреве в электрической камерной печи-модели, приведены пересчеты температурного поля по сечению промышленного бруса в различные временные периоды с использованием полученных масштабов.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, материал модели, линейный масштаб модели, температурный и временной масштабы моделирования, нагрев металла под термообработку и обработку металлов давлением, температурное поле в заготовке.

DOI: 10.17073/0368-0797-2018-1-12-20

При нагреве заготовок в печи под термическую обработку и обработку металлов давлением стремятся максимально быстро нагреть поверхность металлической заготовки до конечной температуры при допустимом перепаде температуры по ее сечению в процессе нагрева. Параметрами, влияющими на время нагрева заготовок и температурное поле в них, являются начальная температура поверхности и центра заготовки, начальная температура печи, а также скорость подъема температуры в печи, которая оказывает решающее влияние на перепад температуры по сечению заготовки и, как следствие, температурные напряжения в ней. В процессе нагрева заготовок температурные напряжения в них не должны превышать допустимых значений напряжений в упругой области, зависящих от толщины нагреваемого слоя металла и его химического состава. Таким образом, для получения качественной заготовки при максимальной производительности печи, необходимо использовать оптимальный режим нагрева, отработку которого во избежание больших материальных затрат можно осуществлять с помощью математического и физического моделирования. Несмотря на преимущества математического моделирования, в частности,

с использованием численных методов [1 – 4], в нем заложена предопределенность результатов свойствами выбранного метода моделирования [5]. При физическом моделировании объект изучения – реальный образец заменяется моделью, нагрев которой осуществляется в печи-модели [6].

Целью работы является выбор материала модели, расчет линейного масштаба модели и ее изготовление, расчет температурного и временного масштабов моделирования, экспериментальный нагрев модели в печи-модели с замером температуры в центре и на поверхности модели с дальнейшим пересчетом температуры на реальный образец-заготовку.

Согласно работе [7], материал модели должен выдерживать высокие температуры при нагреве и обладать невысокой теплопроводностью. В табл. 1 с использованием литературных данных [8 – 10] приведены некоторые свойства строительных материалов, которые можно использовать в качестве модели: алебастр; раствор портландцемента с песком при различных соотношениях цемента, песка и воды; кирпич красный и силикатный. Приведены также физические параметры материала промышленного образца-заготовки из стали ШХ15.

Согласно данным, приведенным в табл. 1, минимальные значения плотности, теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности соответствуют нулевой влажности в материале, с повышением которой значения перечисленных теплофизических параметров возрастают. В этой связи для проведения эксперимента использовались просушенные образцы практически с нулевой влажностью. Одновременно, для использования более точных значений теплопроводности и темпе-

ратуропроводности материала для модели, проводили эксперименты.

На первом этапе исследования была сделана попытка использования алебаstra и смеси, состоящей из одной части цемента, трех частей песка и воды, а также силикатного кирпича для изготовления модели. На рис. 1 представлены результаты нагрева в электрической камерной печи цилиндрического образца диаметром 37 мм из алебаstra и цилиндрического образца

Таблица 1

**Материалы модели и образца**

Table 1. Materials of the sample and the model

Показатель при влажности 0 – 30 %			
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Коэффициент температуропроводности · 10 <sup>6</sup> , м <sup>2</sup> /с
Материал модели			
Алебастр			
544 – 1250	0,299 – 0,647	946 – 1808	0,245 – 0,406
Раствор цементный песчаный			
1964 – 1900	0,819 – 1,805	975 – 1352	0,442 – 0,702
Кирпич красный			
1600 – 2100	0,386 – 1,419	628 – 1612	0,355 – 0,593
Кирпич силикатный			
1700 – 2000	0,56 – 2,0	938 – 1403	0,476 – 0,753
Материал образца			
Сталь ШХ15			
Средняя теплопроводность образца $\lambda_{обр}$ при начальной температуре 20 °С, Вт/(м·К)	Средняя температуропроводность образца $a_{обр} \cdot 10^6$ при начальной температуре 20 °С, м <sup>2</sup> /с	Средняя теплопроводность образца $\lambda_{обр}$ при средней температуре 350 °С, Вт/(м·К)	Средняя температуропроводность образца $a_{обр} \cdot 10^6$ при средней температуре 350 °С, м <sup>2</sup> /с
26,64	6,94	20,05	6,11

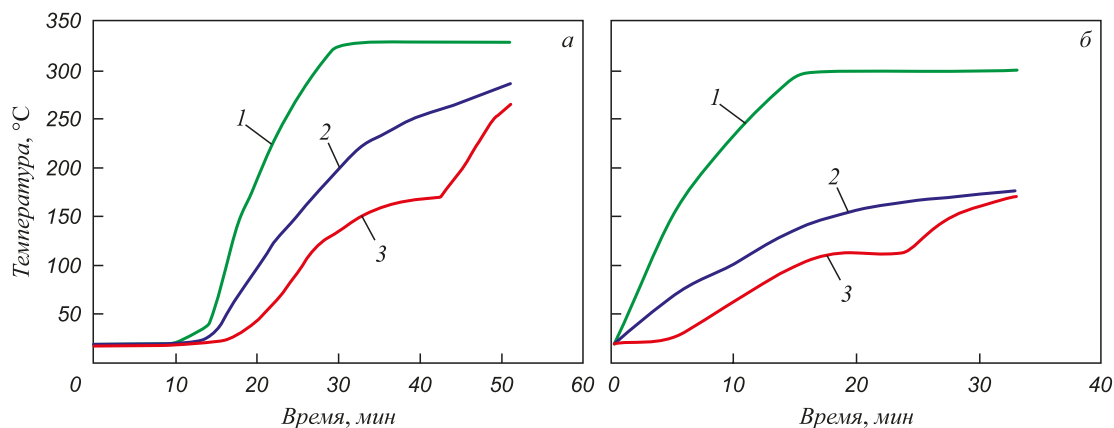


Рис. 1. Изменение температуры печи (1), поверхности (2) и центра (3) цилиндрической заготовки диаметром 37 мм из алебаstra (а) и цилиндрической заготовки диаметром 33 мм из одной части цемента и трех частей песка (б)

Fig. 1. Changing the temperature of the furnace (1), the surface (2) and the center (3) of the cylindrical billet with diameter of 37 mm of alabaster (a) and the cylindrical billet with diameter of 37 mm 33 mm from one part of cement and three parts of sand (b)

диаметром 33 мм из одной части цемента и трех частей песка, которые предварительно просушивались в печи при температуре 150 °С. В процессе нагрева с помощью хромель-алюмелевых термопар фиксировались температуры печи, поверхности и центра образцов. Можно предположить, что результатом скачкообразного снижения температуры в центре заготовок из алебаstra (на 43 мин) и раствора (на 25 мин) может быть наличие пор по сечению заготовок, полученных в процессе изготовления моделей.

На рис. 2 представлены результаты нагрева цилиндрического образца диаметром 0,038 м и длиной 0,09 м, изготовленного из силикатного кирпича. Видно, что повышение температуры по сечению заготовки происходит плавно, что говорит об однородной структуре материала модели.

Предпочтение в настоящей работе было отдано силикатному кирпичу в виду более однородной его структуры без пустот по сечению, вследствие его изготовления в заводских условиях. Красный кирпич не использовался в качестве материала для модели из-за плохой его обрабатываемости и хрупкости в сравнении с силикатным кирпичом. Использование алебаstra и смеси цемента, песка и воды для изготовления модели неприемлемо из-за вероятного образования пор и, как следствие, неравномерности теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости по сечению модели.

В табл. 1 приведены литературные данные плотности, теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости различных строительных материалов и стали ШХ15. Теплофизические параметры для строительных материалов представлены в виде интервалов значений, зависящих от влажности. Для определения теплопроводности образцов с размерами 10×10×10 мм

из стали ШХ15 и силикатного кирпича использовали измеритель теплопроводности КИТ-02 ЦКБ «Теплофон». Прибор позволяет измерять теплопроводность в диапазоне от 0,01 до 200 Вт/(м·К) с допустимой погрешностью 25 % и длительностью измерения от 10 до 35 мин. Согласно данным прибора «Теплофон», средняя теплопроводность трех образцов из стали ШХ15 при температуре 20 °С составила 26 Вт/(м·К), что хорошо согласуется с литературными данными. Значение теплопроводности стали ШХ15 при средней температуре образца 350 °С было взято из литературных данных и представлено в табл. 1.

На данном приборе не удалось определить значение теплопроводности силикатного кирпича, что может быть связано с его недостаточными возможностями при определении теплопроводности материалов с показателем менее 1 Вт/(м·К). В этой связи было использовано расчетное значение теплопроводности силикатного кирпича с использованием формулы (3). При этом значения теплоемкости и плотности были взяты из литературных данных (см. табл. 1), а значение среднего коэффициента температуропроводности вычислено по формуле (1) [11] с использованием экспериментального нагрева, представленного на рис. 2:

$$a_{cp} = \frac{R^2}{2k_{\phi} \Delta\tau_{cp}} (1 + \varepsilon + \eta), \quad (1)$$

где  $a_{cp}$  – средний коэффициент температуропроводности образца, м<sup>2</sup>/с;  $R$  – радиальное расстояние между фиксированными точками замера температуры на оси и поверхности образца, м;  $k_{\phi}$  – коэффициент формы цилиндрического образца (принимается 2);  $\Delta\tau_{cp}$  – среднее время запаздывания температуры на оси образца по сравнению с температурой на его поверхности, с;

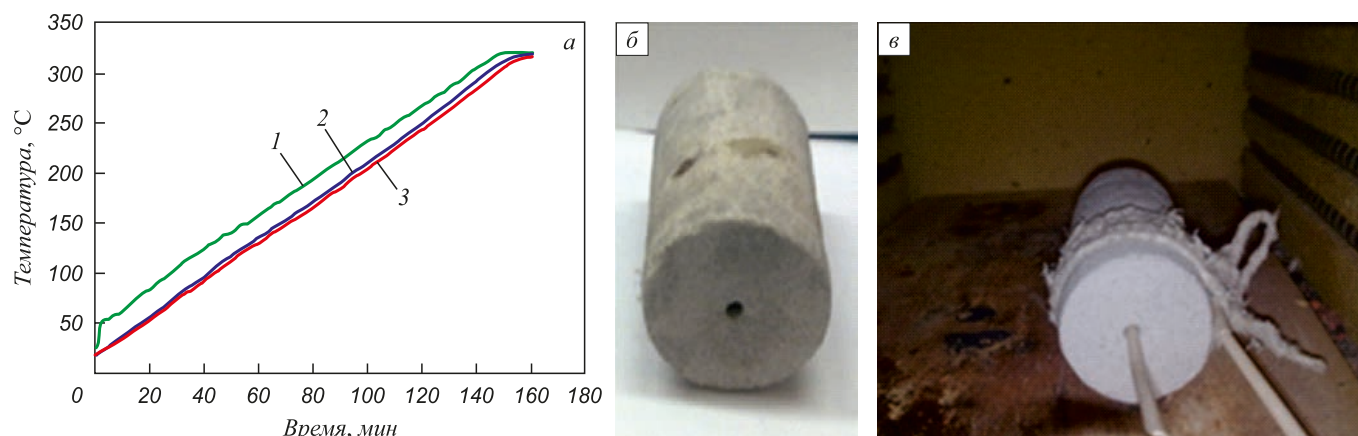


Рис. 2. Режим нагрева (а) цилиндрического образца (б) из силикатного кирпича диаметром 0,038 м и длиной 0,09 м в печи (в) с установкой термопар в центре и на его поверхности:

1 – температура печи; 2 – температура поверхности образца; 3 – температура центра образца

Fig. 2. Heating mode (a) of one cylindrical sample (b) from a silicate brick with a diameter of 0.038 m and a length of 0.09 m in the furnace (c) with installation of thermocouples in the center and on the surface:

1 – temperature of the furnace; 2 – temperature of the sample surface; 3 – temperature of the sample center

$\varepsilon$  – поправка, учитывающая влияние непостоянства скорости при нагревании;  $\eta$  – поправка, учитывающая зависимость теплофизического параметра от температуры.

Среднее время запаздывания температуры  $\Delta\tau_{cp}$  рассчитывается по формуле

$$\Delta\tau_{cp} = \frac{1}{t_k - t_n} \int_{t_n}^{t_k} [\psi_1(\tau) - \psi_2(\tau)] d\tau, \quad (2)$$

где  $\psi_1(\tau)$  – уравнение кривой нагрева поверхности образца с начальной температуры  $t_n$  до конечной  $t_k$ ;  $\psi_2(\tau)$  – уравнение кривой нагрева центра образца с начальной температуры  $t_n$  до конечной  $t_k$ .

Исходя из вышесказанного, с учетом углубления на поверхности под термопару, средний коэффициент температуропроводности силикатного кирпича, рассчитанный по формуле (1), составил  $0,447 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , что хорошо согласуется с данными табл. 1 для силикатного кирпича при минимальной влажности образца:

$$a_{cp, \text{сил.кир}} = \frac{0,0165^2}{2 \cdot 2 \cdot 2,536 \cdot 60} (1 + 0 + 0) = 0,447 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Расчет коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{сил.кир}}$  силикатного кирпича [7] проводили с использованием формулы

$$a_{cp, \text{сил.кир}} = \frac{\lambda_{\text{сил.кир}}}{c_{\text{сил.кир}} \rho_{\text{сил.кир}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{\text{сил.кир}}$  – коэффициент теплопроводности силикатного кирпича, Вт/(м·К);  $c_{\text{сил.кир}}$  – теплоемкость силикат-

ного кирпича, Вт/(кг·К);  $\rho_{\text{сил.кир}}$  – плотность силикатного кирпича, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом,

$$\lambda_{\text{сил.кир}} = a_{\text{сил.кир}} c_{\text{сил.кир}} \rho_{\text{сил.кир}} = 0,447 \cdot 10^{-6} \cdot 938 \cdot 1700 = 0,713 \text{ Вт(м·К)}.$$

Между печью-образцом и печью-моделью, а также образцом и моделью должно выполняться геометрическое подобие. В этой связи для расчета размеров модели необходимо рассчитать линейный масштаб моделирования и расположить модель в печи-модели в соответствии с расположением образца в печи-образце. Исходные данные для расчета линейного масштаба моделирования, а именно внутренние размеры печи-образца и печи-модели, размеры образца, а также формулы и результаты расчетов приведены в табл. 2.

Формула для расчета времени нагрева модели  $\tau_{\text{мод}}$  получена путем преобразования уравнения, которое основано на равенстве критерия Фурье для образца и модели [12 – 15]. Исходные данные, включающие начальную и конечную температуру нагрева образца, коэффициент температуропроводности образца при средней его температуре, а также формула для расчета времени нагрева модели и его значение приведены в табл. 3.

Расчет температуры греющей среды в печи при нагреве модели основан на преобразовании и решении уравнения (6): удельный тепловой поток, подведенный к поверхности нагреваемой заготовки излучением и конвекцией, равен удельному тепловому потоку, отведенному вглубь заготовки теплопроводностью:

Таблица 2

**Расчет линейного масштаба моделирования и размеров модели**

Table 2. Calculation of the linear scale of modeling and model dimensions

Показатель	Образец		Модель	
	обозначение	значение	обозначение	значение
Длина печи, м	$L_{\text{п.обр}}$	3	$L_{\text{п.мод}}$	0,3
Ширина печи, м	$B_{\text{п.обр}}$	2,5	$B_{\text{п.мод}}$	0,2
Высота печи, м	$H_{\text{п.обр}}$	2,1	$H_{\text{п.мод}}$	0,12
Гидравлический диаметр печи, м	$d_{\text{г.обр}} = \frac{4B_{\text{п.обр}} H_{\text{п.обр}}}{2B_{\text{п.обр}} + 2H_{\text{п.обр}}} = 2,28$		$d_{\text{г.мод}} = \frac{4B_{\text{п.мод}} H_{\text{п.мод}}}{2B_{\text{п.мод}} + 2H_{\text{п.мод}}} = 0,15$	
Линейный масштаб по сечению блюма	$k_b = \frac{d_{\text{г.обр}}}{d_{\text{г.мод}}}$			15,22
Линейный масштаб по длине блюма	$k_l = \frac{L_{\text{п.обр}}}{L_{\text{п.мод}}}$			10
Ширина блюма, м	$b_{\text{обр}}$	0,55	$b_{\text{мод}} = \frac{b_{\text{обр}}}{k_b}$	0,036
Длина блюма, м	$l_{\text{обр}}$	2,2	$l_{\text{мод}} = \frac{l_{\text{обр}}}{k_l}$	0,22

Расчет временного масштаба моделирования и времени нагрева модели

Table 3. Calculation of the time scale of modeling and model heating time

Показатель	Образец		Модель	
	обозначение	значение	обозначение	значение
Материал	ШХ15	–	Силикатный кирпич	–
Начальная температура заготовки, °С	$t_{обр.н}$	20	–	–
Конечная температура заготовки, °С	$t_{обр.к}$	680	–	–
Коэффициент температуропроводности при 350 °С, м <sup>2</sup> /с	$a_{обр}$	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$a_{мод}$	$4,47 \cdot 10^{-7}$
Время нагрева, ч	$\tau_{обр}$	11,5	$\tau_{мод}$	–
Критерий Фурье для образца и модели	$F_{о.обр}$	–	$F_{о.мод}$	–
	$F_{о.обр} = F_{о.мод}$ $\frac{a_{обр} \tau_{обр}}{(0,5b_{обр})^2} = \frac{a_{мод} \tau_{мод}}{(0,5b_{мод})^2}$			
Время нагрева модели в печи-модели, ч	$\tau_{мод} = \frac{a_{обр} \tau_{обр} (0,5b_{мод})^2}{(0,5b_{обр})^2 a_{мод}}$		0,679	
Временной масштаб моделирования	$n_{\tau} = \frac{\tau_{обр}}{\tau_{мод}} = \frac{11,5}{0,679} = 16,94$			

$$(\alpha_{изл} + \alpha_{к})(t_{с} - t_{м}) = \lambda_{м} \frac{dt_{м}}{dx_{м}}; \quad (4)$$

$$\left\{ \frac{C_{пр} \left[ \left( \frac{T_{с}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{м}}{100} \right)^4 \right]}{t_{с} - t_{м}} + \alpha_{к} \right\} (t_{с} - t_{м}) = \lambda_{м} \frac{dt_{м}}{dx_{м}}; \quad (5)$$

$$C_{пр} \left[ \left( \frac{T_{с}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{м}}{100} \right)^4 \right] + (t_{с} - t_{м}) \alpha_{к} = \lambda_{м} \frac{dt_{м}}{dx_{м}}. \quad (6)$$

После приведения уравнения (6) к безразмерному виду, приравнивания масштабов и их последующей замене на размерные величины, а также последующего приравнивания полученного уравнения для образца и модели, получим следующее выражение

$$\begin{aligned} \lambda_{обр} \frac{t_{с.к.обр}}{S_{н.обр}} - C_{пр.обр} t_{с.к.обр}^4 - \alpha_{к.обр} t_{с.к.обр} = \\ = \lambda_{мод} \frac{t_{с.к.мод}}{S_{н.мод}} - C_{пр.мод} t_{с.к.мод}^4 - \alpha_{к.мод} t_{с.к.мод}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\lambda_{обр}$ ,  $\lambda_{мод}$  – коэффициент теплопроводности образца и модели, Вт/(м·К);  $t_{с.обр}$ ,  $t_{с.мод}$  – температура греющей среды образца и модели, °С;  $x_{обр}$ ,  $x_{мод}$  – толщина нагреваемого слоя образца и модели, м;  $\alpha_{изл.обр}$ ,  $\alpha_{изл.мод}$  – коэффициент теплоотдачи излучением при нагреве образца и модели, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{к.обр}$ ,  $\alpha_{к.мод}$  – коэффициент

теплоотдачи конвекцией при нагреве образца и модели, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В табл. 4 представлены исходные данные для расчета температуры греющей среды в печи-модели, который осуществляется с помощью программы Mathcad.

Моделирование нагрева слитка из стали ШХ15 в электрическом нагревательном колодце проводили в электрической муфельной камерной печи-модели. Размеры печи-образца и печи-модели, а также образца и модели приведены в табл. 2. Расчеты линейного, температурного и временного масштабов моделирования нагрева модели из силикатного кирпича представлены в табл. 5, режим нагрева модели – на рис. 3.

По представленному на рис. 3 режиму нагрева можно пересчитать температуры, полученные на модели, на температуры промышленного образца-заготовки [16 – 26]. Результаты пересчета представлены в табл. 6.

**Выводы.** Показана принципиальная возможность расчета температурного поля в заготовке, нагреваемой в электрической печи, с использованием физического моделирования.

Для осуществления физического моделирования необходимы следующие действия:

- выбрать материал модели и изготовить ее;
- рассчитать линейный масштаб моделирования, исходя из соответствия размеров печи-образца и печи-модели с одной стороны, и размеров образца и модели с другой;
- рассчитать временной масштаб моделирования, исходя из равенства критерия Фурье для образца и модели;

Исходные данные для расчета температуры греющей среды в печи-модели

Table 4. Initial data for the calculation of temperature of the heating medium in the furnace model

Показатель	Образец		Модель	
	обозначение	значение	обозначение	значение
Степень черноты	$\varepsilon_{\text{м.обр}}$	0,8	$\varepsilon_{\text{м.мод}}$	0,6
Степень черноты электрических нагревателей	$\varepsilon_{\text{п.обр}}$	0,9	$\varepsilon_{\text{п.мод}}$	0,9
Степень развития кладки	$\omega_{\text{п.обр}}$	5,54	$\omega_{\text{п.мод}}$	0,55
Приведенный коэффициент излучения	$C_{\text{пр.обр}}$	4,46	$C_{\text{пр.мод}}$	3,04
Коэффициент кинематической вязкости воздуха, м <sup>2</sup> /с	$\nu_{\Sigma\text{обр}}$	$6,13 \cdot 10^{-5}$	$\nu_{\Sigma\text{мод}}(t_{\text{с.к. мод}})$	$5,3310^{-5}$
Коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К)	$\lambda_{\Sigma\text{обр}}$	0,052	$\lambda_{\Sigma\text{мод}}(t_{\text{с.к. мод}})$	0,048
Критерий Прандтля воздуха	$Pr_{\Sigma\text{обр}}$	0,662	$Pr_{\Sigma\text{мод}}(t_{\text{с.к. мод}})$	0,659
Критерий Нуссельта	$Nu_{\text{обр}}$	37,45	$Nu_{\text{мод}}(t_{\text{с.к. мод}})$	5,06
Коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$a_{\text{к.обр}}$	3,51	$a_{\text{к.мод}}(t_{\text{с.к. мод}})$	2,0
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{обр}}$	19,1	$\lambda_{\text{мод}}$	0,713
Теплоемкость, Дж/(кг·К)	$C_{\text{обр}}$	520	$C_{\text{мод}}$	938
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{\text{обр}}$	7653	$\rho_{\text{мод}}$	1700
Коэффициент температуропроводности, м <sup>2</sup> /с	$a_{\text{обр}}$	$6,11 \cdot 10^{-6}$	$a_{\text{мод}}$	$4,47 \cdot 10^{-7}$
Скорость среды в печи	$w_{\text{с.обр}}$	0	$w_{\text{с.мод}}$	0
Содержание азота в воздухе	$N_2$	79	$N_2$	79
Содержание кислорода в воздухе, %	$O_2$	21	$O_2$	21
Время нагрева, ч	$t_{\text{обр}}$	11,5	–	–
Температура греющей среды конечная, °С	$t_{\text{с.к. обр}}$	700	$t_{\text{с.к. мод}}$	604
Температура греющей среды начальная, °С	$t_{\text{с.н. обр}}$	23	$t_{\text{с.н. мод}}$	20

Масштабы, температуры и время для моделирования нагрева

Table 5. Scales, temperatures and time for heating modeling

Линейный масштаб по сечению блюма	Линейный масштаб по длине блюма	Температурный масштаб		Временной масштаб
$k_b = \frac{d_{\text{г.обр}}}{d_{\text{г.мод}}} = 15,22$	$k_l = \frac{L_{\text{п.обр}}}{L_{\text{п.мод}}} = 10$	$n_t = \frac{t_{\text{обр}}}{t_{\text{мод}}} = 1,158$		$n_\tau = \frac{\tau_{\text{обр}}}{\tau_{\text{мод}}} = 16,94$
Ширина модели-блюда, м	Длина модели-блюда, м	Температура нагрева модели-печи начальная, °С	Температура нагрева модели-печи конечная, °С	Время нагрева модели, ч
$b_{\text{мод}} = \frac{b_{\text{обр}}}{k_d} = 0,036$	$l_{\text{мод}} = \frac{l_{\text{обр}}}{k_l} = 0,220$	$t_{\text{п.мод.н}} = 23$	$t_{\text{п.мод.к}} = 604$	$\tau_{\text{мод}} = 23$

– рассчитать температурный масштаб моделирования, исходя из баланса удельного теплового потока на поверхность нагреваемого металла излучением и конвекцией и удельного теплового потока вглубь нагреваемой заготовки;

– нагреть модель в печи-модели с замером времени нагрева модели и температуры на ее поверхности и центре и произвести пересчет времени и температуры

на образец с учетом температурного и временного масштабов моделирования.

Полученные результаты позволяют использовать физическое моделирование с целью расчета температурного поля в реальной заготовке и, если это необходимо, корректирования температуры печи с целью оптимизации времени нагрева садки.

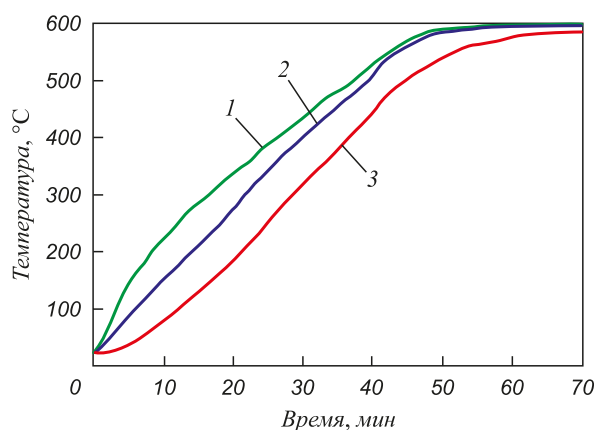


Рис. 3. Режим нагрева образца из силикатного кирпича:  
1 – температура печи; 2 – температура поверхности образца;  
3 – температура центра образца

Fig. 3. Heating mode of the sample of sand-lime brick:  
1 – temperature of the furnace; 2 – temperature of the sample surface;  
3 – temperature of the sample center

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. El Fakir O. etc. Numerical study of the solution heat treatment, forming, and in-die quenching (HFQ) process on AA5754 // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2014. Vol. 87. P. 39 – 48.
2. Su B. etc. Numerical simulation of microstructure evolution of heavy steel casting in casting and heat treatment processes // ISIJ international. 2014. Vol. 54. No. 2. P. 408 – 414.
3. Zhou S. etc. Numerical simulation and experimental investigation on densification, shape deformation, and stress distribution of Ti6Al4V compacts during hot isostatic pressing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. Vol. 88. No. 1 – 4. P. 19 – 31.
4. Zhao Guo, Jianxin Zhou, Dongqiao Zhang etc. Numerical simulation of the through process of aerospace titanium alloy casting filling, solidification, and hot isostatic pressing // 8th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS), 14–17 October 2016, Seattle, Washington.
5. Новосельцев В.Н. Достоинства и недостатки математического моделирования // Фундаментальные исследования. 2004. № 6. С. 121 – 122.
6. Крючков О.Б., Копасов Е.А., Роненко В.О. Оптимизация нагрева теплотехнически массивных заготовок с использованием физического моделирования // Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении». Вып. 7. Межвуз. сб. науч. ст. 2013. № 6 (109). С. 135 – 137.
7. Золотухин Н.М. Нагрев и охлаждение металла. – М.: Машиностроение, 1973. – 192 с.
8. Основин В.Н., Шуляков Л.В., Дубяго Д.С. Справочник по строительным материалам и изделиям. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. – 443 с.
9. Гришук Т.В. Строительные материалы и изделия. – Минск: Дизайн ПРО, 2004. – 312 с.
10. Домокеев А.Г. Строительные материалы. – М: Высшая школа, 1988. – 415 с.
11. Юрнев В.Н., Лебедев Л.Д. Теплотехнический справочник. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.
12. Теплотехника металлургического производства. Т. 1. Теоретические основы: Учебное пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.А. Арутюнов, В.В. Белоусов и др. – М.: МИСИС, 2002. – 608 с.
13. Теплотехника металлургического производства. Т. 2. Конструкция и работа печей: Учеб. пособие для вузов / В.А. Кривандин, В.В. Белоусов, Г.С. Сборщиков и др. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
14. Кривандин В.А., Марков Б.Л. Металлургические печи. – 2-е изд., доп и перераб. – М.: Металлургия, 1977. – 464 с.
15. Крючков О.Б., Иванов А.С., Кострюков А.С. Компьютерное моделирование для анализа температурных полей в нагреваемых металлических заготовках // Известия ВолгГТУ. Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении». Вып. 9. Межвуз. сб. науч. ст. 2014. № 9 (136). С. 127 – 129.
16. Крючков О.Б., Волчков В.М., Крохалев А.В. Моделирование и теплотехнические расчеты процессов в нагревательных и термических печах. Часть 2. Использование вычислительной техники для расчета времени нагрева металлических изделий: Учеб. пособие. – 2-е изд., стер. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 183 с.
17. Афонин В.В., Федосин С.А. Моделирование систем: Учебно-практич. пособие. – М.: Интуит, 2016. – 231 с.
18. Белов В.В. Компьютерное моделирование и оптимизирование составов композиционных строительных материалов. – М.: АСВ, 2015. – 264 с.
19. Sawaragi Y., Soeda T., Omatu S. Modeling, estimation and their applications for distributed parameter system. – Berlin – Heidelberg – New York: Springer – Verlag, 1978.

Таблица 6

### Методика пересчета данных модели на образец

Table 6. Conversion technique of model data to the sample

Показатель	Значение показателя и расчетные данные		
Время нагрева модели, мин	20	42	61
Временной масштаб, $n_t$	16,94		
Время нагрева образца, мин	$20 \cdot 16,94 = 338$	$42 \cdot 16,94 = 711,5$	$61 \cdot 16,94 = 1033,3$
Температура в центре модели, °C	184	478	579
Температурный масштаб, $n_t$	1,158		
Температура в центре образца, °C	$184 \cdot 1,158 = 213$	$478 \cdot 1,158 = 554$	$579 \cdot 1,158 = 671$
Температура на поверхности модели, °C	275	537	596
Температура на поверхности образца, °C	$275 \cdot 1,158 = 319$	$537 \cdot 1,158 = 622$	$596 \cdot 1,158 = 690$
Температура печи-модели, °C	337	549	600
Температура печи-образца, °C	$337 \cdot 1,158 = 390$	$549 \cdot 1,158 = 636$	$600 \cdot 1,158 = 695$

20. Белов Н.Н., Копаница Д.Г., Югов Н.Т. Математическое моделирование динамической прочности конструкционных материалов: Учеб. пособие. – М.: АСВ, 2013. – 562 с.
21. Li Zongyu, Barr P.V., Brimacombe J.K. Computer simulation of the slab reheating furnace // Canadian Metallurgical Quarterly. 1988. Vol. 27. P. 187 – 196.
22. Голубева Н.В. Математическое моделирование систем и процессов: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2013. – 192 с.
23. Wang H., Li G., Lei Y. etc. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature // The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ) International. Vol. 45 (2005). No. 9. P. 1291 – 1296.
24. Albertos P., Sala Piqueras A. Iterative Identification and Control: Advances in Theory and Applications. Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA, 2002.
25. Jang J.H. etc. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. P. 4326 – 4332.
26. Жирков А.М., Подопригора Г.М., Цицунава М.Р. Математическое моделирование систем и процессов: Учеб. пособие. – СПб.: ЛаньКПТ, 2016. – 192 с.

Поступила 5 февраля 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2018. VOL. 61. No. 1, pp. 12–20.

## THE USE OF PHYSICAL MODELING TO DETERMINE TEMPERATURE FIELD IN THE BILLET

**O.B. Kryuchkov**

**Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia**

**Abstract.** When heating billets in a furnace for heat treatment and metal forming, it should be possible to quickly heat the surface of the billet with a minimum differential temperature in its cross-section, which depends on the initial temperature of the surface and the center of the billet, the initial furnace temperature and the speed of its increasing. The temperature difference over the cross section of the billet contributes to thermal stresses in it. In the process of billets heating, thermal stresses must not exceed allowable stress values in the elastic region, depending on the thickness of the heated layer of metal and its chemical composition. Thus, to obtain high-quality billets at a maximum furnace performance, it is necessary to use the optimal heating mode, the testing of which to avoid high material costs can be realized by using physical modeling. Physical modeling of the object of study – real sample is replaced by a model where the heating is carried out in a furnace model. For physical modeling, one need to choose material of the model, to select or manufacture the furnace model, to calculate the linear scale of the model and to make it possible to calculate the temperature and time scales of modeling, according to which to make model heating at model furnace with the measurement of the temperature field of the model with a further recalculation of the temperature on a real sample. The calculating method is proposed for the temperature field in an industrial billet of ShKh15 steel heated for heat treatment, namely for softening annealing, in an electric well, using physical modeling, conducted in a laboratory chamber electric furnace. The article justifies the choice of material for making the model, and the method of calculation linear, temperature and time scale of the simulation. Based on the experimental measurements of the temperature on the surface and in the center of the model when it is heated in an electric chamber furnace model, the recalculations are given for the temperature field over the cross section of the industrial bloom in different time periods using the received scale.

**Keywords:** physical modeling, material models, linear scale of the model, temperature and time scale of simulation, metal heating under thermal-processing and treatment of metals by pressure, temperature field in the billet.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2018-1-12-20

### REFERENCES

1. El Fakir O. etc. Numerical study of the solution heat treatment, forming, and in-die quenching (HFQ) process on AA5754. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2014, vol. 87, pp. 39–48.
2. Su B. etc. Numerical simulation of microstructure evolution of heavy steel casting in casting and heat treatment processes. *ISIJ international*. 2014, vol. 54, no. 2, pp. 408–414.
3. Zhou S. etc. Numerical simulation and experimental investigation on densification, shape deformation, and stress distribution of Ti6Al4V compacts during hot isostatic pressing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 88, no. 1-4, pp. 19–31.
4. Zhao Guo, Jianxin Zhou, Dongqiao Zhang, Yangdong Li, Yajun Yin. Numerical simulation of the through process of aerospace titanium alloy casting filling, solidification, and hot isostatic pressing. *8th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS), 14–17 October 2016, Seattle, Washington*.
5. Novosel'tsev V.N. Advantages and disadvantages of mathematical modeling. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2004, no. 6, pp. 121–122. (In Russ.).
6. Kryuchkov O.B., Kopasov E.A., Ronenko V.O. Optimization of heating of massive billets using physical modeling. *Izvestiya Volg-GTU. Seriya Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii*. Issue 7, 2013, no. 6 (109), pp. 135–137. (In Russ.).
7. Zolotukhin N.M. *Nagrev i okhlazhdenie metalla* [Heating and cooling of metal]. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 192 p. (In Russ.).
8. Osnovin V.N., Shulyakov L.V., Dubyago D.S. *Spravochnik po stroitel'nyim materialam i izdeliyam* [Reference book on construction materials and products]. Rostov-on-Don: Feniks, 2008, 443 p. (In Russ.).
9. Grishuk T.V. *Stroitel'nye materialy i izdeliya* [Construction materials and products]. Minsk: Dizain PRO, 2004, 312 p. (In Russ.).
10. Domokeev A.G. *Stroitel'nye materialy* [Construction materials]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 415 p. (In Russ.).
11. Yurenev V.N., Lebedev L.D. *Teplotekhnicheskii spravochnik* [Reference book on heat engineering]. Moscow: Energiya, 1976, 896 p. (In Russ.).
12. Krivandin V.A., Arutyunov V.A., Belousov V.V. etc. *Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva. T. 1. Teoreticheskie osnovy: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Heat engineering of metallurgical production. Vol. 1. Theoretical bases: Manual for universities]. Moscow: MISIS, 2002, 608 p. (In Russ.).
13. Krivandin V.A., Belousov V.V., Sborshchikov G.S. etc. *Teplotekhnika metallurgicheskogo proizvodstva. T. 2. Konstruktsiya i rabota pechei: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Heating engineering of metallurgical production. Vol. 2. Design and operation of furnaces: Manual for universities]. Moscow: MISIS, 2002, 736 p. (In Russ.).
14. Krivandin V.A., Markov B.L. *Metallurgicheskie pechi* [Metallurgical furnaces]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 464 p. (In Russ.).
15. Kryuchkov O.B., Ivanov A.S., Kostryukov A.S. Computer modeling for the analysis of temperature fields in heated metal billets.



- Izvestiya VolgGTU. Seriya Problemy materialovedeniya, svarki i prochnosti v mashinostroenii.* 2014, no. 9 (136), pp. 127–129. (In Russ.).
16. Kryuchkov O.B., Volchkov V.M., Krokhaliev A.V. *Modelirovanie i teplotekhnicheskie raschety protsessov v nagrevatel'nykh i termicheskikh pechakh. Chast' 2. Ispol'zovanie vychislitel'noi tekhniki dlya rascheta vremeni nagreva metallicheskih izdelii: ucheb. posobie* [Modeling and thermo-technical calculations of processes in heating and thermal furnaces. Part 2. Using computer technology for calculating the heating time of metal products: Manual]. Volgograd: VolgGTU, 2017, 183 p. (In Russ.).
  17. Afonin V.V., Fedosin S.A. *Modelirovanie sistem: uchebno-prakticheskoe posobie* [Systems modeling: Manual]. Moscow: Intuit, 2016, 231 p. (In Russ.).
  18. Belov V.V. *Komp'yuternoe modelirovanie i optimizirovanie sostavov kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov: Monografiya* [Computer modeling and optimization of the compositions of composite constructing materials: Monograph]. Moscow: ASV, 2015, 264 p. (In Russ.).
  19. Sawaragi Y., Soeda T., Omatu S. *Modeling, estimation and their applications for distributed parameter system.* Berlin–Heidelberg–New York: Springer–Verlag, 1978.
  20. Belov N.N., Kopanitsa D.G., Yugov N.T. *Matematicheskoe modelirovanie dinamicheskoi prochnosti konstruktivnykh materialov. Uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of the dynamic strength of structural materials: Manual]. Moscow: ASV, 2013, 562 p. (In Russ.).
  21. Li Zongyu, Barr P.V., Brimacombe J.K. *Computer Simulation of the Slab Reheating Furnace.* Canadian Metallurgical Quarterly. 1988, vol. 27, pp. 187–196.
  22. Golubeva N.V. *Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov: Uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of systems and processes: Manual]. St. Petersburg: Lan', 2013, 192 p. (In Russ.).
  23. Wang H., Li G., Lei Y., Zhao Y., Dai Q., Wang J. Mathematical heat transfer model research for the improvement of continuous casting slab temperature. *The Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ) International.* vol. 45 (2005), no. 9, pp. 1291–1296.
  24. Albertos P., Sala Piqueras A. *Iterative Identification and Control: Advances in Theory and Applications.* Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, NJ, USA, 2002.
  25. Jang J.H. etc. Investigation of the slab heating characteristics in a reheating furnace with the formation and growth of scale on the slab surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2010, vol. 53, pp. 4326–4332.
  26. Zhirkov A.M., Podoprigora G.M., Tsutsunava M.R. *Matematicheskoe modelirovanie sistem i protsessov: uchebnoe posobie* [Mathematical modeling of systems and processes: Manual]. St. Petersburg: Lan' KPT, 2016, 192 p. (In Russ.).

**Information about the author:**

**O.B. Kryuchkov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Materials Technology (bardb@mail.ru)**

Received February 5, 2016