

Казанцев В.И. стр. 350 - технологии нагрева стали

$k_3 = \text{коэффициент усреднения температур по сечению}$
 $k_3 = f(Bi)$: Плите $t_{cp} = t_c + \frac{\Delta t}{3}$; при $Bi = 0$; при $Bi = \infty - 2,752$
указан $t_{cp} = t_c + \frac{1}{2} \Delta t$ (гдете t_{cp}) $Bi = 1,76$
с. 315. $шор = 1,67$
R.

Составители: Владимир Иванович Становой,
Андрей Алексеевич Буйлов

РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА,
ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА
И РЕЖИМОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА
В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Методические указания

Редактор Л.И. Романова
Технический редактор А.И. Колодяжная

Ротапринт. Подписано к печати 21.02.91. Формат бум. 60x90 / 16
Объем 3 п.л. Тир. 600 экз. Зак. 152 Бесплатно

НПО ЦКТИ. 194021, Ленинград, Политехническая ул., д.24

Государственный комитет РСФСР по делам науки и высшей школы
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

РАСЧЕТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА,
ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА
И РЕЖИМОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА
В ПЕЧАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

Методические указания

ЛЕНИНГРАД
1991

С о с т а в и т е л и : В.И.Становой, А.А.Буйлов.

Расчеты горения топлива, параметров внешнего теплообмена и режимов нагрева металла в печах периодического действия: Метод. указания /Сост.: В.И.Становой, А.А.Буйлов. - Л.: ЛГУ, 1991. - 46 с.

Методические указания предназначены для студентов физико-металлургического и механико-машиностроительного факультетов, изучающих курс "Тепловая работа нагревательных устройств" и выполняющих курсовой проект по теме "Тепловой расчет и конструирование печи".

Рассматриваются современные методики расчета основных процессов, определяющих тепловую работу печей, а также качественные и количественные связи между параметрами, обеспечивающими требуемый по технологии режим нагрева металла. Эти знания потребуются для успешного решения проблем, возникающих при разработке и совершенствовании технологических процессов современного материаловедения.

Рекомендованы к изданию кафедрой "Пластическая обработка металлов давлением" и методическим советом физико-металлургического факультета.

Табл. 10. Ил. 8. Библиогр.: 6 назв.

ВВЕДЕНИЕ

Физико-металлургический факультет ЛГУ готовит инженеров-металлургов в основном для предприятий машиностроительной промышленности. Производство машин теснейшим образом связано с тепловой обработкой (нагревом) различных деталей и заготовок, которую обычно выполняют в печах различного типа. Нагрев металла является одной из важнейших стадий производственного процесса, влияющей на производительность, качество и себестоимость выпускаемой продукции.

В настоящее время в машиностроении для нагрева металлических заготовок под прессование, штамповку и термическую обработку используют печи самых различных конструкций, которые могут быть объединены общим признаком. В подавляющем большинстве случаев (85-90%) - это камерные печи садочного типа. В таких печах нагрев заготовок производят отдельными садками, с последующим их охлаждением вне рабочего пространства, или вместе с печью, что и определяет периодичность нагрева. Широкое применение такого типа печей объясняется, в первую очередь, их универсальностью, позволяющей обрабатывать в них по разным режимам самые разнообразные по форме и размерам заготовки, что в условиях машиностроения делает эти печи незаменимыми.

Для того чтобы технически грамотно выбрать и использовать печь существующей конструкции для решения конкретной технологической задачи, инженер-металлург должен быть знаком с основами ее тепловой работы, под которой понимают совокупность всех процессов, протекающих в печи и определяющих основной процесс - нагрев металла. Эти знания будут ему необходимы также при составлении технических заданий на конструирование новых и реконструкцию существующих печей, предназначенных для реализации новых технологических процессов.

Сущность тепловой работы нагревательных и термических печей садочного типа одинакова и определяется сочетанием процессов тепловыделения, теплообмена и теплоусвоения, которые протекают в рабочем

пространстве. Поэтому задачи расчета таких печей сводят к выявлению условий протекания указанных процессов, которые обеспечат заданный режим нагрева и заданную производительность печи.

Все студенты, изучающие дисциплину "Тепловая работа нагревательных устройств", выполняют курсовой проект на тему "Тепловой расчет и конструирование печи". При этом они знакомятся с современными методами расчета основных процессов, определяющих тепловую работу печей, а также качественные и количественные связи между параметрами, обеспечивающими требуемый технологический режим нагрева металла. Полученные знания помогут им в дальнейшей инженерной деятельности успешно решать проблемы, связанные с технологиями современного материаловедения.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПОРЯДОК РАСЧЕТА КАМЕРНЫХ САДОЧНЫХ ПЕЧЕЙ

Камерные садочные печи представляют собой агрегаты периодического действия. Для печей такого типа обычно задают следующие исходные данные.

1. Технологическое назначение печи: нагрев под обработку давлением или один из видов термообработки – нормализация, закалка и т.д. Вид нагрева определяет конечную температуру нагрева поверхности заготовок, а также требования к точности нагрева, т.е. допустимый технологией перепад температур между поверхностью и центром заготовки в момент выдачи ее из печи.
2. Размеры нагреваемых заготовок и марка стали, из которой они изготовлены. По марке стали из справочников определяют ее теплофизические свойства, необходимые для расчетов.
3. Число заготовок, одновременно нагреваемых в печи. Именно по заданному числу заготовок устанавливают размеры рабочей камеры печи путем формирования садки. Если же размеры печи заданы, то из заготовок komponуется садка. В обоих случаях садку формируют таким образом, чтобы обеспечить наиболее благоприятные условия нагрева каждой заготовки в отдельности, а следовательно, и всей садки в целом. Общие принципы формирования садки излагаются на занятиях, а способ расположения заготовок для конкретного задания обсуждается с преподавателем во время консультации.
4. Вид топлива: природный газ, мазут или смесь природного газа с коксовым или доменным газами. При использовании смеси газов для отопления печи задается теплотворная способность этой смеси.
5. Тягодутьевые ресурсы, определяющие условия отвода продуктов горения из печи и условия подачи к топливосжигающим устройствам воздуха, идущего на горение.
6. Температура подогрева воздуха, идущего на горение. Она необ-

ходима для выбора и расчета рекуператора, который должен обеспечить подогрев воздуха до заданной температуры за счет теплоты отходящих продуктов сгорания.

Расчет нагревательных и термических печей садового типа обычно проводят в следующем порядке:

Производит компоновку (формирование) садки из заданного числа одновременно нагреваемых заготовок.

Рассчитывают горение топлива с целью определения объема продуктов сгорания и их состава.

Рассчитывают параметры, характеризующие интенсивность теплообмена излучением в рабочем пространстве печи.

Выполняют расчет нагрева металла в соответствии с температурным режимом печи, выбранным с учетом технологических ограничений по нагреву металла.

Составляют тепловой баланс печи, позволяющий определить необходимый расход топлива и выбрать тип и число топливосжигающих устройств.

Проводят аэродинамические расчеты печи, т.е. расчеты движения газов в дымовом и воздушном трактах печи.

Выбирают тип рекуператора и рассчитывают его основные рабочие параметры.

Более подробно о целях и порядке расчета каждого из названных выше разделов будет сказано ниже.

Задание на курсовой проект имеет следующий вид (с числовыми данными одного из вариантов задания):

1. Тип печи: камерная садовая с выдвижным подом.

2. Материал и габариты нагреваемых заготовок: слитки из стали 40 диаметром 1000 мм и длиной 2000 мм.

3. Садка печи: два слитка.

4. Режим нагрева металла: нагрев под нормализацию. Начальная температура металла 20°C. Конечная температура поверхности заготовок 850°C. Конечный перепад температур по сечению заготовки 10°C.

5. Топливо: смесь природного и доменного газов, $Q_n^p = 25000$ кДж/м³, влажность $W = 30$ г/м³.

6. Аэродинамические расчеты дымового и воздушного трактов.

7. Расчет рекуператора для подогрева воздуха до температуры 200°C.

РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Это одна из стадий теплового расчета пламенных печей, в результате чего определяют следующие характеристики: низшую теплоту сгорания топлива; теоретический и действительный объемы воздуха; выход и состав продуктов горения; плотность продуктов горения.

Исходные данные:

1) для жидкого и твердого топлива – марка топлива, его состав, влажность;

2) для газообразного топлива – состав, влажность, низшая теплотворная способность смешанного топлива, если оно образуется путем смешения двух видов газообразного топлива (например, для смеси природного и доменного газов).

Порядок выполнения расчета

Все расчеты ведут на единицу количества топлива (на 1 кг жидкого и твердого; на 1 м³ газообразного).

1. Рабочий состав топлива. Расчеты проводят по рабочей массе топлива, характеризующей состав топлива в практических условиях его использования. Коэффициент пересчета состава сухого топлива на влажный (рабочую массу топлива) определяют из выражений

$$k = \frac{100 - H_2O}{100 - (H_2O)_T} ; \quad (1)$$

$$H_2O = 100W / (W + 803,6) , \quad (2)$$

где $(H_2O)_T$ – содержание влаги в топливе по справочным данным, %;

H_2O – заданное содержание влаги в топливе, %; W – содержание водяных паров в топливе, г/м³.

Рабочий состав топлива определяют путем умножения соответствующих компонентов сухого топлива на коэффициент пересчета k :

$$CO_2^P = CO_2^C \cdot k \quad \text{и т.д.} \quad (3)$$

2. Теплота сгорания топлива. Низшую теплоту сгорания топлива определяют по формулам:

для жидкого и твердого топлива (мДж/кг)

$$Q_H^p = 0,339C^p + 1,03H^p - 0,109(O^p - S^p) - 0,25W^p, \quad (4)$$

для газообразного топлива (МДж/м³)

$$Q_H^p = 0,127CO^p + 0,108H_2^p + 0,234H_2S^p + 0,357CH_4^p + 0,596C_2H_4^p, \quad (5)$$

где C^p, H^p, CO^p, H₂^p, ... - содержание соответствующих компонентов в рабочем составе топлива, %.

Для смешанного топлива теплота сгорания обычно задается. В этом случае необходимо определить долю отдельных видов топлива в смеси и ее состав. Если обозначить теплоты сгорания смеси газов Q_{см}, первого Q' и второго Q'', то доля первого газа в смеси составит $x = (Q_{см} - Q'') / (Q' - Q'')$, а доля второго - (1 - x). Теплоту сгорания каждого из газов, входящих в смесь, вычисляют по их рабочему составу.

После определения долей газов находят состав смеси как сумму произведений соответствующих компонентов первого и второго газов на их доли, например,

$$(CO_2)_{см} = x(CO_2)' + (1-x)(CO_2)'' \dots \quad (6)$$

3. Теоретический и действительный объем воздуха. Теоретический расход воздуха L₀ рассчитывают по следующим формулам:

для жидкого и твердого топлива (на 1 кг)

$$L_0 = (0,0889(C^p + 0,375 S^p) + 0,265H^p - 0,0333 O^p) \cdot (1 + 0,00124 d_8); \quad (7)$$

для газообразного топлива (на 1 м³)

$$L_0 = 0,0476 \cdot (0,5CO^p + 0,5H_2^p + 2CH_4^p + 3C_2H_4^p + 1,5H_2S^p - O_2^p) \cdot (1 + 0,00124 d_8), \quad (8)$$

где d₈ - влагосодержание сухого воздуха, г/м³. Обычно в расчетах влагосодержание сухого воздуха принимают равным 10 г/м³.

Действительный объем воздуха, зависящий от вида топлива, необходимый для полного сжигания единицы топлива, определяют из соотношения

$$L_g = \alpha L_0, \quad (9)$$

где α - коэффициент избытка воздуха, зависящий от вида топлива и типа горелочного устройства. При расчетах топлива коэффициент избытка воздуха принимается равным 1,05...1,15 для газообразного топлива, 1,15...1,25 для жидкого и 1,2...1,6 для твердого.

4. Выход и состав продуктов горения. Качественный состав продуктов горения любого топлива в воздухе одинаков: CO₂, H₂O, SO₂, N₂.

О₂. Количество продуктов полного сгорания (м³) для каждой составляющей вычисляют по формулам:

для жидкого и твердого топлива (на 1 кг)

$$\left. \begin{aligned} V_{CO_2} &= 0,0187C^p; & V_{H_2O} &= 0,112H^p + 0,0124H_2O^p + 0,00124L_g \cdot d_8; \\ V_{SO_2} &= 0,007S^p; & V_{O_2} &= 0,21(\alpha - 1)L_0; \\ V_{N_2} &= 0,008N^p + 0,79L_g; \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

для газообразного топлива (на 1 м³)

$$\left. \begin{aligned} V_{CO_2} &= 0,01 \cdot (CO_2^p + CO^p + CH_4^p + 2C_2H_4^p); & & \\ V_{H_2O} &= 0,01 \cdot (2CH_4^p + 2C_2H_4^p + H_2^p + H_2O^p + H_2S^p + 0,124L_g \cdot d_8); & & \\ V_{N_2} &= 0,01 \cdot (N_2 + 79L_g); & V_{O_2} &= 0,21 \cdot (\alpha - 1)L_0; & V_{SO_2} &= 0,01H_2S^p. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Общее количество продуктов горения при полном сжигании единицы топлива находят из выражения

$$V_g = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{SO_2} + V_{O_2}. \quad (12)$$

Состав продуктов горения в объемных процентах определяют следующим образом:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_g} \cdot 100; \quad H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V_g} \cdot 100 \dots \quad (13)$$

Плотность продуктов горения (кг/м³) рассчитывают по их процентному составу:

$$\rho_g = \frac{0,44 \cdot CO_2 + 0,18H_2O + 0,28 \cdot N_2 + 0,32 \cdot O_2 + 0,64 \cdot SO_2}{22,4}. \quad (14)$$

Т а б л и ц а 1
Состав основных видов топлива (%)

Вид топлива	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₄	C	S	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂	H ₂ S	Зола
Доменный газ	3,3	27,4	0,9	-	-	-	10,0	-	58,4	-	-	-
Коксовый газ	50,8	5,4	26,5	1,7	-	-	2,8	0,4	11,4	1,0	-	-
Природный газ	2,0	0,6	93,0	0,4	-	-	0,3	-	3,0	0,5	0,2	-
Мазут малосернистый												
марка 10	12,3	-	-	-	85,6	0,5	-	1,0	-	0,5	-	0,1
марка 20	11,5	-	-	-	85,3	0,6	-	2,0	-	0,5	-	0,1
Мазут сернистый												
марка 10	11,5	-	-	-	84,2	2,5	-	1,0	-	0,7	-	0,1
марка 20	11,3	-	-	-	83,1	2,9	-	2,0	-	0,5	-	0,2

Составы различных видов топлива, наиболее часто используемого в промышленных печах, приведены в табл. 1.

ПРИМЕР РАСЧЕТА

Рассмотрим пример расчета смешанного газообразного топлива. Согласно заданию печь должна отапливаться смесью природного и доменного газов (теплота сгорания 25 МДж/м³, влажность 30 г/м³). Состав природного и доменного газов приведен в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Газ	CO ₂	CO	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	O ₂	H ₂ S	Влажность, г/м ³
Природный	0,3	0,6	2,0	3,0	93,0	0,4	0,5	0,2	30
Доменный	10	27,4	3,3	58,4	0,9	-	-	-	30

Пересчитаем по формулам (1) - (3) состав сухого газа на рабочий:

$$H_2O = 100 \cdot 30 / (30 + 803,6) = 3,6\%;$$

$$k = (100 - 3,6) / 100 = 0,964.$$

Рабочий состав природного газа

$$CO_2^P = 0,3 \cdot 0,964 = 0,29\% \text{ и т.д.}$$

Рабочий состав доменного газа

$$CO_2^D = 10 \cdot 0,964 = 9,64\% \dots$$

Рабочие составы (%) природного и доменного газов сведем в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Газ	CO ₂ ^P	CO ^P	H ₂ ^P	N ₂ ^P	CH ₄ ^P	C ₂ H ₄ ^P	O ₂ ^P	H ₂ S ^P	H ₂ O ^P	Сумма
Природный	0,29	0,58	1,93	2,89	89,65	0,39	0,48	0,19	3,6	100
Доменный	9,64	26,41	3,18	56,3	0,87	-	-	-	3,6	100

Теплоту сгорания каждого газа вычисляем по формуле (5):

$$Q_{нгр}^p = 0,127 \cdot 0,58 + 0,108 \cdot 1,93 + 0,234 \cdot 0,19 + 0,357 \cdot 89,65 + 0,596 \cdot 0,39 = 32,56 \text{ МДж/м}^3;$$

$$Q_{нгр}^p = 0,127 \cdot 26,41 + 0,108 \cdot 3,18 + 0,357 \cdot 0,87 = 4,0 \text{ МДж/м}^3.$$

Определим состав смеси.

Доля природного газа в смеси:

$$x = (25,0 - 4,0) / (32,56 - 4,0) = 0,735,$$

доля доменного газа: $(1 - 0,735) = 0,265$.

Рабочий состав смешанного газа [см. ф-лу (6)]:

$$CO_{2см}^p = 0,29 \cdot 0,735 + 9,64 \cdot 0,265 = 2,77 \% \dots$$

Рабочий состав (%) смешанного газа сведем в табл. 4.

Таблица 4

$CO_{2см}^p$	$CO_{см}^p$	$H_{2см}^p$	$N_{2см}^p$	$CH_{4см}^p$	$C_2H_{4см}^p$	$O_{2см}^p$	$H_2S_{см}^p$	$H_2O_{см}^p$	Сумма, %
2,77	7,42	2,26	17,04	66,14	0,28	0,35	0,14	3,6	100

Теоретически необходимое количество воздуха (m^3) определяем по формуле (8):

$$L_0 = 0,0476 (0,5 \cdot 7,42 + 0,5 \cdot 2,26 + 2 \cdot 66,14 + 3 \cdot 0,28 + 1,5 \cdot 0,14 - 0,35) \cdot (1 + 0,00124 \cdot 10) = 6,58.$$

Действительное количество воздуха при $\alpha = 1,1$ согласно (9):

$$L_g = 1,1 \cdot 6,58 = 7,23 \text{ м}^3.$$

Количество продуктов сгорания (m^3) рассчитываем по формулам (11):

$$V_{CO_2} = 0,01 \cdot (2,77 + 7,42 + 66,14 + 2 \cdot 0,28) = 0,77 \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = 0,01 \cdot (17,04 + 79 \cdot 7,23) = 5,88 \text{ м}^3;$$

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot (2 \cdot 66,14 + 2 \cdot 0,28 + 2,26 + 3,6 + 0,14 + 0,124 \cdot 7,23 \cdot 10) = 1,62 \text{ м}^3;$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,1 - 1) \cdot 6,58 = 0,137 \text{ м}^3;$$

$$V_{SO_2} = 0,01 \cdot 0,14 = 0,0014 \text{ м}^3.$$

Общее количество продуктов сгорания согласно (12):

$$V_g = 0,77 + 1,62 + 5,88 + 0,137 + 0,0014 = 8,41 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем состав продуктов сгорания смешанного газа по формулам (13)

$$CO_2 = \frac{0,77}{8,41} \cdot 100 = 9,14\%; \quad H_2O = (1,62/8,41) \cdot 100 = 19,27\%;$$

$$SO_2 = (0,0014/8,41) \cdot 100 = 0,02\%; \quad N_2 = 5,88 \cdot 100/8,41 = 69,94\%;$$

$$O_2 = 0,137 \cdot 100/8,41 = 1,63.$$

Плотность продуктов сгорания вычисляем согласно (14):

$$\rho_g = \frac{(0,44 \cdot 9,14 + 0,18 \cdot 19,27 + 0,28 \cdot 69,94 + 0,32 \cdot 1,63 + 0,64 \cdot 0,02)}{22,4} = 1,23 \text{ кг/м}^3.$$

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА

На поверхность нагреваемого в печи материала теплота передается за счет излучения и конвекции: $q_m = q_{конв} + q_{изл}$, где $q_{конв}$ и

$q_{изл}$ — тепловые потоки, передаваемые соответственно конвекцией и излучением. Следует иметь в виду, что доля теплоты, передаваемой конвекцией в печах с рабочей температурой более 700°C , не превышает 15...20% и падает с увеличением температуры. Существующие методики расчета конвективного теплообмена дают относительную погрешность около 20...30%, поэтому в дальнейшем будем считать, что конвективный тепловой поток составляет 10% от лучистого теплового потока: $q_{конв} = 0,1 q_{изл}$. Тогда общий удельный поток теплоты, передаваемый на поверхность металла: $q_m = 1,1 q_{изл}$.

Тепловой поток излучением на поверхность нагреваемого материала может быть вычислен по формуле

$$q_{изл} = C_{пр} [(T_{ср} / 100)^4 - (T_{пов} / 100)^4] ,$$

где $q_{изл}$ - тепловой поток излучением; $T_{ср}$, $T_{пов}$ - температуры среды и поверхности нагреваемого материала, К; $C_{пр}$ - приведенный коэффициент излучения, Вт/м²К⁴.

При расчете теплового потока на поверхность садки в качестве источника излучения может быть выбрана печь, газ или кладка. В реальных условиях режим нагрева контролируется по показаниям печной термомпары. Температура, фиксируемая горячим спаем такой термомпары, дает промежуточное значение между температурой газа (наиболее высокой температурой в печи), кладки и металла. Принято считать, что на поверхность печной термомпары и металла передаются равные тепловые потоки, поэтому в дальнейшем при его определении принимаем в качестве источника излучения печь. Тогда с учетом конвекции тепловой поток на металл

$$q_M = 1,1 C_{пм} [(T_{пч} / 100)^4 - (T_{пов} / 100)^4] , \quad (15)$$

где $C_{пм}$ - приведенный коэффициент излучения в системе печь - металл, Вт/м²К⁴; $T_{пч}$ - температура печи, К;

Исходя из того что тепловой поток излучением на металл одинаков независимо от того, что мы выбираем в качестве источника излучения, то, зная q_M , можно определить температуру газов и кладки из выражений

$$q_M = C_{гм} [(T_g / 100)^4 - (T_{пов} / 100)^4] = C_{км} [(T_{кл} / 100)^4 - (T_{пов} / 100)^4] ,$$

тогда

$$T_g = 100 \cdot \sqrt[4]{q_M / C_{гм} + (T_{пов} / 100)^4} \quad \text{и} \quad (16)$$

$$T_{кл} = 100 \cdot \sqrt[4]{q_M / C_{км} + (T_{пов} / 100)^4} ,$$

где $C_{гм}$, $C_{км}$ - приведенные коэффициенты излучения соответственно в системе газ - металл и кладка - металл, Вт/м²К⁴; T_g - температура

$$C_{пм} = \epsilon_{пм} \cdot 5,67$$

газа, К; $T_{кл}$ - температура внутренней поверхности кладки, К.

Таким образом, основной задачей расчета внешнего теплообмена является определение приведенных коэффициентов излучения.

Приведенные коэффициенты излучения рассчитывают по формулам:

$$C_{пм} = \frac{5,67 \cdot \epsilon_M \cdot \varphi_{МК}}{1 - \varphi_{ММ} (1 - \epsilon_M)} ; \quad (17)$$

$$C_{гм} = \frac{5,67 \cdot \epsilon_M \cdot \epsilon_g}{\epsilon_g + \varphi_{км} (1 - \epsilon_g)} ; \quad (18)$$

$$C_{км} = \frac{5,67 \cdot \epsilon_M [1 + (1 - \epsilon_g) \frac{F_M}{F_{кл}}]}{1 + (1 - \epsilon_g)(1 - \epsilon_M) \frac{F_M}{F_{кл}}} ; \quad (19)$$

где 5,67 - коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²К⁴; ϵ_M - степень черноты металла; F_M - поверхность металла, участвующая в теплообмене, м²; $F_{кл}$ - поверхность кладки, м²; $\varphi_{МК} = (1 - \varphi_{ММ})$ - угловой коэффициент с металла на кладку; $\varphi_{ММ} = F_M / (F_{кл} + F_M)$ - угловой коэффициент с металла на металл; $\varphi_{км}$ - угловой коэффициент с кладки на металл, численно равный $\varphi_{ММ}$; ϵ_g - степень черноты газа.

Степень черноты продуктов сгорания, зависящая от состава дыма, его температуры и эффективной длины луча, может быть определена по выражению

$$\epsilon_g = 1 - \exp(-10 K p s_{эф}) , \quad (20)$$

где K - коэффициент ослабления; p - суммарное парциальное давление паров воды и углекислого газа в продуктах сгорания, МПа; $s_{эф}$ - эффективная длина луча, м.

Коэффициент ослабления вычисляют по формуле

$$K = \frac{0,8 (1 + 20 p_{H_2O}) (1 - 0,38 \frac{T_g}{1000})}{\sqrt{10 \cdot p \cdot s_{эф}}} ; \quad (21)$$

если $\varphi_{ММ} \neq 0$; $\varphi_{МК} \neq 0$:

$$K = \frac{0,8 (1 + 20 p_{H_2O}) (1 - 0,38 \frac{T_g}{1000})}{\sqrt{p \cdot s_{эф}}} \rightarrow \text{зависит от } p \text{ и } s_{эф}$$

Эффективная длина луча зависит от объема, занимаемого газом V_r , и поверхности, его ограничивающей. Обычно ее определяют по формуле А.С.Невского:

$$S_{эф} = 3,5(V_{пч} - V_M)/(F_M + F_{кл}), \quad (22)$$

где $V_{пч}$ - объем печи, m^3 ; V_M - объем металла, нагреваемого в печи, m^3 .

Пример расчета

В качестве примера рассмотрим расчет приведенных коэффициентов излучения при нагреве двух слитков диаметром $d = 1000$ мм и длиной $l = 2000$ мм.

Расчет внешнего теплообмена в проектируемых печах начинают с определения основных размеров печи в зависимости от числа слитков и их размещения. Размещение слитков на полу печи в каждом конкретном случае необходимо согласовать с преподавателем. В данном случае слитки расположены в один ряд по ширине пода и в два ряда по длине (рис. 1). Тогда длина рабочего пространства $L = 5,1$ м; ширина $B = 2,5$ м. В термических печах высоту рабочего пространства до замка свода H , зависящую от ширины пода и максимальной температуры газов в печи, можно определить по выражению

$$H = (0,45 + 0,65B) \cdot t_r \cdot 10^{-3} = (0,45 + 0,65 \cdot 2,5) 1,2 = 2,5 \text{ м.}$$

Максимально возможная температура газов в этих печах не превышает $1200^\circ C$. В нагревательных печах величину H принимают исходя из конструктивных соображений и обычно выбирают $H = B$.

В камерных печах рабочее пространство перекрывают арочным сводом с центральным углом $\varphi = 60^\circ$. При таком центральном угле свода $R = B$, а высота боковой стены

$$h = R \cdot \cos(\varphi/2) = 2,5 \cdot \cos 30^\circ = 2,165 \text{ м.}$$

Средняя высота печи

$$h_{ср} = (h + H)/2 = (2,165 + 2,5)/2 = 2,33 \text{ м.}$$

Определим геометрические параметры излучения. Поверхность кладки

$$\begin{aligned} F_{кл} &= F_{торц.стен} + F_{бок.стен} + F_{свода} + F_{пода} = \\ &= 2 B h_{ср} + 2 L h + \frac{\pi R \varphi}{180} L + L B = 2 \cdot 2,5 \cdot 2,33 + 2 \cdot 5,1 \cdot 2,165 + \\ &+ 3,14 \cdot 2,5 \cdot 60 \cdot 5,1 / 180 + 5,1 \cdot 2,5 = 59,8 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

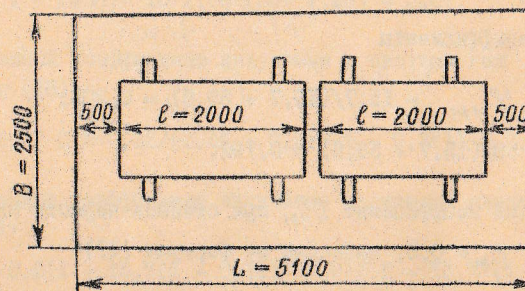
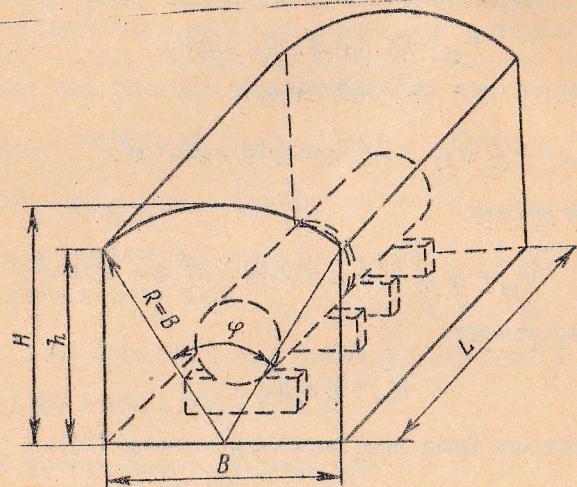


Рис. 1. Эскиз рабочего пространства печи и схема расположения слитков на ее полу

Излучающую поверхность металла определим по формуле

$$F_M = n(2\pi r \ell + 2\pi r^2),$$

где n - число слитков; r и ℓ - радиус и длина слитка, м:

$$F_M = 2(2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5^2) = 15,7 \text{ м}^2.$$

При нагреве пластин размерами $a \times b \times c$

$$F_M = 2n(ab + bc + ac).$$

Объем рабочего пространства печи

$$V_{пч} = V L h_{ср} = 2,5 \cdot 5,1 \cdot 2,33 = 29,7 \text{ м}^3.$$

Объем металла

$$V_M = n \pi r^2 \ell = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5^2 \cdot 2 = 3,14 \text{ м}^3.$$

При нагреве пластин

$$V_M = n a b c.$$

Эффективную длину луча определим согласно (22):

$$S_{эф} = 3,5(29,7 - 3,14)/(59,8 + 15,7) = 1,23 \text{ м}.$$

Угловые коэффициенты

$$\varphi_{KM} = \varphi_{MM} = 15,7/(15,7 + 59,8) = 0,208;$$

$$\varphi_{MK} = 59/(15,7 + 59,8) = 0,792.$$

Приведенный коэффициент $C_{пм}$ при степени черноты окисленной стали, равной $\varepsilon_M = 0,8$, вычислим по формуле (17):

$$C_{пм} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,792 / (1 - 0,208(1 - 0,8)) = 3,443 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4.$$

Для расчета двух других приведенных коэффициентов необходимо сначала определить степень черноты газов, заполняющих рабочее пространство печи. В расчете горения топлива было определено, что в продуктах сгорания содержится 9,14 % CO_2 и 19,27 % H_2O . Следовательно, парциальное давление углекислого газа $p_{\text{CO}_2} = 0,0914 \cdot 0,0981 = 0,009 \text{ МПа}$, а паров воды $p_{\text{H}_2\text{O}} = 0,1927 \cdot 0,0981 = 0,019 \text{ МПа}$. Далее, для того чтобы использовать формулы (21) и (20), необходимо определить температуру газов, заполняющих печь. Так как заранее мы не знаем, при каких значениях температуры газов нужно вычислить степень черноты газов, то этой температурой задаемся. Определим степень черноты газов при трех значениях температур:

$$t_{r1} = t_{пк} = 850^\circ\text{C}; \quad t_{r2} = t_{пк} + 100 = 950^\circ\text{C};$$

$$t_{r3} = t_{пк} + 200 = 1050^\circ\text{C}.$$

Рассмотрим в качестве примера расчет при $t_{r1} = 850^\circ\text{C}$. Коэффициент ослабления согласно (21):

$$K = 0,8(1 + 20 \cdot 0,019) \cdot (1 - 0,38 \cdot 1123/1000) / \sqrt{10 \cdot 0,028 \cdot 1,23} = 1,08;$$

$$T_{r1} = t_{r1} + 273 = 850 + 273 = 1123 \text{ К}.$$

Степень черноты газов по формуле (20):

$$\varepsilon_r = 1 - \exp[-10 \cdot 1,08 \cdot 0,028 \cdot 1,23] = 0,31.$$

Приведенный коэффициент излучения в системе газ - металл в соответствии с (18):

$$C_{гм} = 5,67 \cdot 0,8 \cdot 0,31 / (0,31 + 0,208(1 - 0,31)) = 3,1 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4.$$

Приведенный коэффициент излучения в системе кладка - металл по формуле (19):

$$C_{км} = 5,67 \cdot 0,8(1 + 15,7(1 - 0,31)/59,8) / (1 + 15,7 \cdot (1 - 0,31)(1 - 0,8) / 59,8) = 5,17 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4.$$

Аналогично рассчитываем значения приведенных коэффициентов излучения при других температурах газа. Результаты расчета сводим в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

$t_r, ^\circ\text{C}$	ε_r	$C_{\text{ГМ}}$	$C_{\text{КМ}}$	$C_{\text{ПМ}}$
		Вт/м ² К ⁴		
850	0,31	3,1	5,17	3,44
950	0,3	3,0	5,18	
1050	0,28	2,76	5,2	

РАСЧЕТ РЕЖИМА НАГРЕВА МЕТАЛЛА

Принимаем следующий режим нагрева: первый период - нагрев при постоянной температуре печи ($T_{\text{пч}} = \text{const}$) до заданной конечной температуры поверхности заготовок; второй период - выравнивание температур по сечению заготовки при постоянной температуре поверхности ($T_{\text{пов}} = \text{const}$) до заданного конечного перепада температур по сечению заготовки.

Аналитические методы расчета нагрева и охлаждения металла основываются на решении дифференциального уравнения теплопроводности (уравнение Фурье):

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \alpha \nabla^2 T. \quad (23)$$

Для неограниченной пластины, когда тепловой поток становится одномерным, это уравнение запишем в форме

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (24)$$

Применительно к неограниченному цилиндру уравнение (23) в цилиндрических координатах будет иметь вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (25)$$

Чтобы получить однозначное решение уравнений (23) - (25), необходимо задаться краевыми условиями задачи, состоящими из начальных и граничных условий.

Начальное условие характеризует распределение температур в теле в момент времени, принимаемый за начало нагрева или охлаждения тела.

Граничные, или поверхностные, условия определяют изменения температуры на поверхности тела или взаимодействие этой поверхности с окружающей тело средой.

При расчетах режима нагрева и охлаждения металла обычно используют три способа задания граничных условий.

Граничные условия первого рода задают распределение температуры поверхности тела как функции координат и времени.

Граничные условия второго рода определяют тепловой поток на поверхность тела как функцию времени.

Граничные условия третьего рода задают характер изменения температуры окружающей тело среды как функции времени и закон теплообмена между поверхностью тела и этой средой.

Решение уравнения (24) при граничных условиях третьего рода (постоянная температура среды) имеет вид *при постоянной и одинаковой температуре по сечению*

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n} \cdot \cos \left(\mu_n \cdot \frac{x}{S} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot F_0} \quad (26)$$

Здесь значения μ_n являются решениями характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg} \mu = \mu / Bi. \quad (27)$$

Решение уравнения (25) при граничных условиях третьего рода имеет вид

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 J_1(\mu_n)}{\mu_n [J_0^2(\mu_n) + J_1^2(\mu_n)]} \cdot J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot F_0} \quad (28)$$

В этом выражении $J_0(\mu)$ и $J_1(\mu)$ - функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно, а значения μ_n являются решениями характеристического уравнения

$$\frac{J_0(\mu)}{J_1(\mu)} = \frac{\mu}{Bi}. \quad (29)$$

В формулах (26) и (28)

$$\theta = \frac{T_{пч} - T}{T_{пч} - T_n} = \frac{t_{пч} - t}{t_{пч} - t_n} \quad (30)$$

— относительная (безразмерная) избыточная температура; $T_{пч}$, T и T_n — соответственно абсолютная температура печи, температура в рассматриваемой точке тела и средняя начальная температура тела, К; $t_{пч}$, t и t_n — те же температуры, °С; F_0 и Bi — числа Фурье и Био:

$$F_0 = \frac{\alpha \tau}{x^2}, \quad (31)$$

$$Bi = \frac{\alpha x}{\lambda}. \quad (32)$$

При симметричном нагреве пластины толщиной $\delta = 2S$, вычисляя значения F_0 и Bi , за определяющий размер тела принимают $x = S$, т.е. половину ее толщины.

В случае симметричного нагрева цилиндра определяющий размер $x = R$, т.е. равняется его радиусу.

Анализ решений (26) и (28) показывает что при $F_0 \geq 0,3$ для пластины и $F_0 \geq 0,25$ для цилиндра наступает так называемый регулярный (установившийся) тепловой режим, когда в этих решениях можно ограничиться только первым членом ряда. Погрешность вследствие отбрасывания всех членов ряда, кроме первого, при этом составляет менее 1%. В этом случае решение (26) можно записать для поверхности пластины

$$\theta_n = A_{пл} \cdot \cos \mu_1 \exp(-\mu_1^2 \cdot F_0) = P_{пл} \exp(-\mu_1^2 \cdot F_0), \quad (33)$$

а для ее оси

$$\theta_c = A_{пл} \exp(-\mu_1^2 \cdot F_0). \quad (34)$$

В выражениях (33) и (34)

$$A_{пл} = \frac{2 \sin \mu_1}{\mu_1 + \sin \mu_1 \cdot \cos \mu_1}, \quad P_{пл} = A_{пл} \cdot \cos \mu_1.$$

Для оси $A_{пл} \cdot \cos \mu_1 =$

$$= A_{пл} \cos 0 = A_{пл}. \text{ т.к. при } \frac{x}{S} = 0: \cos \mu_1 \cdot 0 = \cos 0 = 1.$$

В области регулярного режима решение (28) для поверхности цилиндра имеет вид

$$\theta_n = A_{цил} J_0(\mu_1) \exp(-\mu_1^2 \cdot F_0) = P_{цил} \exp(-\mu_1^2 \cdot F_0), \quad (35)$$

а для его оси

$$\theta_c = A_{цил} \exp(-\mu_1^2 \cdot F_0). \quad (36)$$

В выражениях (35) и (36) принято:

$$A_{цил} = \frac{2 J_1(\mu_1)}{\mu_1 [J_0^2(\mu_1) + J_1^2(\mu_1)]}; \quad P_{цил} = A_{цил} J_0(\mu_1).$$

Значения величин $P_{пл}$, $P_{цил}$, $A_{пл}$ и $A_{цил}$ в зависимости от числа Bi приведены в табл. 6 и 7.

Коэффициенты для расчета нагрева пластины или цилиндра при промежуточных значениях числа Био можно определить по данным табл. 6 и 7 методом линейной интерполяции.

В области нерегулярного (инерционного) режима нагрева нельзя ограничиться только первым членом ряда решений (26) и (28), поэтому с целью упрощения расчетов эти решения при малых значениях числа обычно представляют в виде графиков для определения температур поверхности и центра пластины и цилиндра [6]. Эти графики приведены на рис. 2-5.

Выравнивание температуры происходит при $T_n = const$, т.е. при граничных условиях первого рода. Расчет выравнивания температур по сечению тела может быть произведен по следующим формулам:

для пластины ($F_0 > 0,06$)

$$\Delta t_k = \Delta t_n \cdot 1,03 \cdot \exp\left(-2,47 \frac{\alpha \tau}{S^2}\right), \quad (37)$$

для цилиндра ($F_0 > 0,08$)

$$\Delta t_k = \Delta t_n \cdot 1,11 \cdot \exp\left(-5,76 \frac{\alpha \tau}{R^2}\right). \quad (38)$$

при нарастающем распределении температур по сечению.

Таблица 6
Коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения пластины толщиной 2 δ

Число Био $\frac{\alpha \cdot \delta}{\lambda}$	μ_1	μ_1^2	$P_{пл}$	$A_{пл}$
0,00	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000
0,01	0,0998	0,0100	0,9970	1,0020
0,1	0,3111	0,0968	0,9670	1,0159
0,5	0,6533	0,4264	0,8490	1,0701
0,6	0,7051	0,4970	0,8230	1,0813
0,7	0,7506	0,5640	0,7980	1,0918
0,8	0,7910	0,6260	0,7740	1,1016
0,9	0,8274	0,6840	0,7510	1,1107
1,0	0,8603	0,7400	0,7290	1,1192
1,5	0,9882	0,9765	0,6459	1,1537
2,0	1,0769	1,1620	0,5590	1,1784
3,0	1,1925	1,4200	0,4480	1,2102
4,0	1,2646	1,5992	0,3700	1,2287
5,0	1,3138	1,7261	0,3140	1,2403
6,0	1,3496	1,8214	0,2730	1,2478
7,0	1,3766	1,8950	0,2410	1,2532
8,0	1,3978	1,9538	0,2160	1,2569
9,0	1,4149	2,0019	0,1960	1,2598
10,0	1,4289	2,0418	0,1800	1,2612
50,0	1,5400	2,3716	0,0400	1,2727
100,0	1,5552	2,4200	0,0200	1,2731
∞	1,5708	2,4670	0,0000	1,2732

В (37) и (38) обозначено: Δt_H и Δt_K — разность температур по сечению тела в начале и конце периода выравнивания, °С.

Выражения (37) и (38) получают из решений уравнений (24) и (25) при граничных условиях первого рода.

Если известны значения Δt_K и Δt_H , то из (37) и (38) легко определить время выдержки, необходимое для выравнивания температур по сечению заготовки от Δt_H до Δt_K .

Таблица 7
Коэффициенты для расчета нагрева или охлаждения цилиндра радиусом R

Число Био $\frac{\alpha \cdot R}{\lambda}$	μ_1	μ_1^2	$P_{цил}$	$A_{цил}$
0	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000
0,01	0,1412	0,0199	0,9980	1,0031
0,1	0,4417	0,1951	0,9750	1,0245
0,5	0,9408	0,8851	0,8800	1,1142
0,6	1,0184	1,0360	0,8580	1,1245
0,7	1,0873	1,1840	0,8360	1,1339
0,8	1,1490	1,3220	0,8150	1,1424
0,9	1,2048	1,4515	0,7950	1,1492
1,0	1,2558	1,5770	0,7740	1,1537
1,5	1,4569	2,1226	0,6875	1,1784
2,0	1,5994	2,5580	0,6100	1,2102
3,0	1,7887	3,1994	0,4920	1,2403
4,0	1,9081	3,6408	0,4070	1,2478
5,0	1,9898	3,9593	0,3450	1,2532
6,0	2,0490	4,1984	0,2990	1,2569
7,0	2,0937	4,3836	0,2620	1,2598
8,0	2,1286	4,5309	0,2340	1,2612
9,0	2,1566	4,6509	0,2100	1,2627
10,0	2,1795	4,7502	0,1910	1,2631
50,0	2,3572	5,5564	0,0400	1,2727
100,0	2,3809	5,6800	0,0200	1,2731
∞	2,4048	5,7830	0,0000	1,2732

Допущено Т. пези

При задании режима нагрева металла важное значение имеет выбор температуры печи $t_{пч} = const$, при которой будет происходить первый период нагрева. При выборе этой температуры нужно учитывать, что при нагреве (охлаждении) тел в них возникают тепловые (температурные) напряжения, которые могут явиться одним из факторов, ограничивающих скорость нагрева [6].

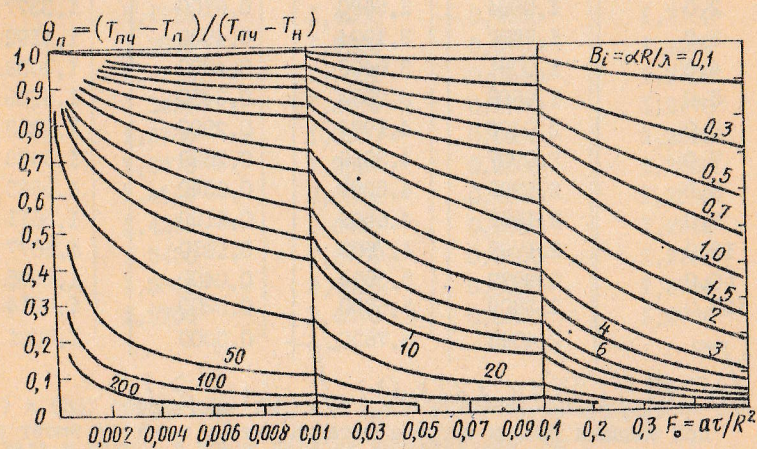
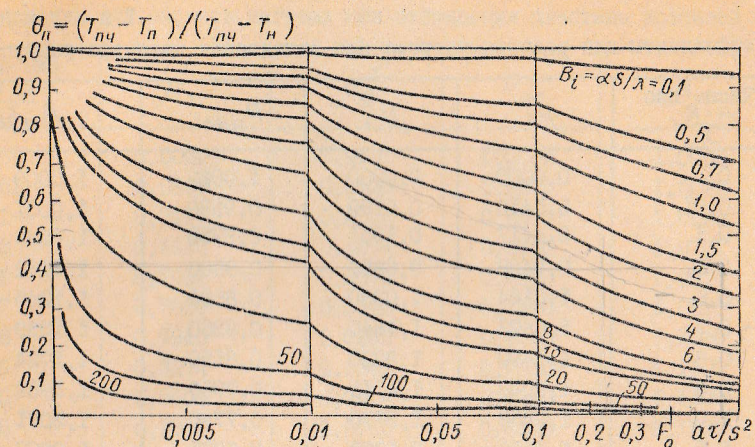


Рис. 2. Температура поверхности неограниченной пластины с толщиной 2S

Рис. 3. Температура поверхности бесконечного цилиндра с радиусом R

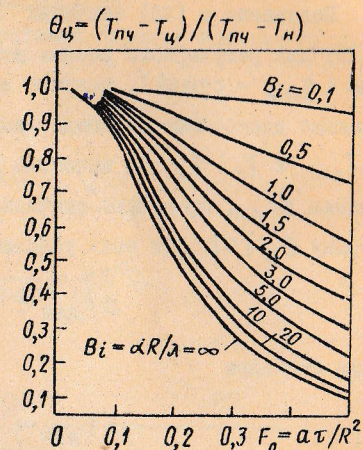
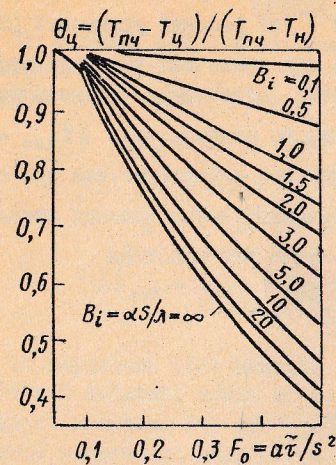


Рис. 4. Температура центра (средней плоскости) неограниченной пластины с толщиной 2S

Рис. 5. Температура центра (оси) бесконечного цилиндра с радиусом R

Температурные напряжения в стали появляются в интервале от 0 до 500°C. При более высоких температурах сталь приобретает достаточную пластичность и эти напряжения никакой опасности для нее не представляют. Мягкие стали обладают пластичностью во всем интервале температур нагрева, и поэтому скорость их нагрева не лимитируется.

Наиболее чувствительны к напряжениям стали с повышенным содержанием C, Si, Cr и некоторых других элементов.

Зависимость температурных напряжений от деформаций, возникающих при термическом расширении тел, имеет вид

$$\sigma = \frac{\beta E}{1 - \nu} (T_{cp} - T), \quad (39)$$

где β - коэффициент линейного расширения стали; E - модуль упругости; ν - отношение Пуассона (для сталей $\nu \approx 0,3$); T_{cp} - средняя температура заготовки; T - температура в рассматриваемом сечении или элементе тела.

Подставив в (39) значения T_{cp} и T из решений уравнений (24) и (25) для регулярного режима нагрева при граничных условиях второго рода ($q_{пов} = const$), получим выражения, позволяющие оценить максимально допустимые перепады температур по сечению тела $\Delta t_{доп} = \Delta T_{доп} = T_n - T_c$. В качестве прочностной характеристики при определении $\Delta t_{доп}$ принимают значение временного сопротивления стали разрыву σ_B [3]. При этих условиях получим для пластины

$$\Delta t_{доп} = \frac{1,05 \sigma_B}{\beta E}, \quad (40)$$

а для цилиндра

$$\Delta t_{доп} = \frac{1,4 \sigma_B}{\beta E}. \quad (41)$$

Определив значение $\Delta t_{доп}$, можно рассчитать допустимые тепловые потоки на поверхность пластины

$$q_{доп} = \frac{2\lambda \Delta t_{доп}}{s} = \frac{2,1 \lambda \sigma_B}{\beta E s} \quad (42)$$

и на поверхность цилиндра

$$q_{доп} = \frac{2\lambda \Delta t_{доп}}{R} = \frac{2,8 \lambda \sigma_B}{\beta E R} \quad (43)$$

Далее из формулы (15) можно определить допустимую температуру печи:

$$t_{пч, доп} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_{доп}}{C_{пч}} - \left(\frac{t_n + 273}{100}\right)^4} - 273, \quad (44)$$

при которой перепады температур, возникающие по сечению тела в процессе его нагрева при условии $t_{пч} = const$, не превысят допустимых значений, рассчитанных согласно (42) или (43).

Выполним расчет нагрева металла под термообработку в соответствии с заданием.

Первый период нагрева

По формуле (41) определяем допустимый перепад температур по сечению слитка.

Для стали 40 из [1] имеем:

$$\sigma_B = 626,6 \text{ Мн/м}^2;$$

$$\beta = 10,72 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град};$$

$$E = 20,29 \cdot 10^4 \text{ Мн/м}^2;$$

$$\Delta t_{доп} = \frac{1,4 \cdot 626,6}{10,72 \cdot 10^{-6} \cdot 20,29 \cdot 10^4} = 403^\circ\text{C}.$$

По выражению (43) находим допустимый тепловой поток на поверхность металла. Так как температурные напряжения должны учитываться при нагреве стали от 20 до 500°C, то сначала определим среднее значение коэффициента теплопроводности в этом интервале температур. Значения λ находим из рис. 6, построенного по данным [1]:

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{500}}{2} = \frac{51 + 37}{2} = 44 \text{ Вт/м}\cdot\text{град};$$

$$q_{доп} = \frac{2 \cdot 44 \cdot 403}{0,5} = 70928 \text{ Вт/м}^2.$$

Далее согласно (44) рассчитываем допустимую температуру печи:

$$t_{пч, доп} = 100 \sqrt[4]{\frac{70928}{3,443} + \left(\frac{20 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 926^\circ\text{C}.$$

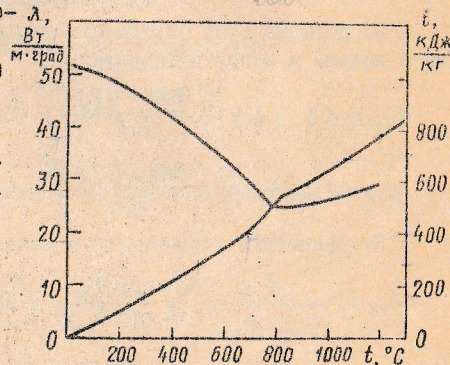


Рис. 6. Зависимости коэффициента теплопроводности λ и теплоемкости i стали 40 от температуры

Температуру печи в первом периоде нагрева принимаем несколько ниже допустимой: $t_{пч} = 900^{\circ}\text{C}$.

Если принять $t_{пч}$ выше допустимой, то это приведет к тому, что и перепад температур по сечению слитка в период нагрева превысит $\Delta t_{доп} = 403^{\circ}\text{C}$. Это вполне допустимо при нагреве мягких сталей, для которых скорость нагрева, т.е. перепады температур по сечению изделий из них, не ограничиваются.

Разобьем первый период нагрева на два интервала по температуре поверхности:

первый интервал: от $t_{п1н} = 20^{\circ}\text{C}$ до $t_{п1к} = 700^{\circ}\text{C}$;

второй интервал: от $t_{п2н} = 700^{\circ}\text{C}$ до $t_{п2к} = 850^{\circ}\text{C}$.

Расчет первого интервала

По формуле (15) определяем тепловые потоки на поверхность металла в начале и конце интервала:

$$q_{1н} = 1,1 \cdot 3,44 \left[\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] = 71359 \text{ Вт/м}^2;$$

$$q_{1к} = 1,1 \cdot 3,44 \left[\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{700 + 273}{100} \right)^4 \right] = 37722 \text{ Вт/м}^2.$$

Коэффициенты теплоотдачи в начале и конце интервала:

$$\alpha_{1н} = \frac{q_{1н}}{t_{пч} - t_{п1н}} = \frac{71359}{900 - 20} = 81 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

$$\alpha_{1к} = \frac{q_{1к}}{t_{пч} - t_{п1к}} = \frac{37722}{900 - 700} = 187 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}.$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи в первом интервале:

$$\alpha_{ср1} = \frac{\alpha_{1н} + \alpha_{1к}}{2} = \frac{81 + 187}{2} = 134 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град};$$

среднее значение коэффициента теплопроводности стали в первом интервале нагрева:

$$\lambda_{ср1} = \frac{\lambda_{п1н} + \lambda_{ц1н} + \lambda_{п1к}}{3} = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{20} + \lambda_{700}}{3} = \frac{51 + 51 + 30}{3} = 44 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}.$$

Величину $\lambda_{ср1}$ определяем по известным значениям температуры по сечению слитка:

$t_{п1н} = 20^{\circ}\text{C}$ - начальная температура поверхности слитка;

$t_{ц1н} = 20^{\circ}\text{C}$ - начальная температура центра слитка;

$t_{п1к} = 700^{\circ}\text{C}$ - температура поверхности слитка в конце первого интервала.

Температура центра слитка $t_{ц1к}$ в конце первого интервала нам пока не известна.

Число Био в первом интервале нагрева согласно (32):

$$Bi_1 = \frac{\alpha_{ср1} \cdot R}{\lambda_{ср1}} = \frac{134 \cdot 0,5}{44} = 1,52.$$

Температурный критерий поверхности в конце первого интервала по (30):

$$\theta_{п1к} = \frac{t_{пч} - t_{п1к}}{t_{пч} - t_{ср1н}} = \frac{900 - 700}{900 - 20} = 0,23,$$

где $t_{ср1н} = t_{п1н} = t_{цн} = 20^{\circ}\text{C}$ - средняя температура по сечению слитка в начале первого интервала нагрева.

Число Fo_1 из графика на рис. 3 определить не представляется возможным, поэтому найдем его из формулы (35):

$$Fo_1 = -\frac{1}{\mu_1^2} \ln \frac{\theta_{п1к}}{P_{цил}} = -\frac{1}{2,14} \ln \frac{0,23}{0,6844} = 0,51.$$

Значения μ_1^2 и $P_{цил}$ определим из табл. 7 методом линейной интерполяции.

Затем по формуле (36) вычислим $\theta_{ц1к}$:

$$\theta_{ц1к} = A_{ц1к} \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo_1} = 1,283 \cdot e^{-2,14 \cdot 0,51} = 1,283 \cdot 0,3357 = 0,43.$$

Из выражения (30) найдем температуру центра слитка в конце первого интервала нагрева:

$$t_{ц1к} = t_{пч} - \theta_{ц1к} (t_{пч} - t_{ср1н}) = 900 - 0,43(900 - 20) = 522^\circ\text{C}.$$

Уточним значение $\lambda_{ср1}$ с учетом известного нам теперь значения температуры центра слитка в конце первого интервала нагрева:

$$\lambda_{ср1}' = \frac{\lambda_{20} + \lambda_{20} + \lambda_{700} + \lambda_{522}}{4} = \frac{51 + 51 + 30 + 37}{4} = 42,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}.$$

Разница между уточненным $\lambda_{ср1}'$ и его первоначальным значением $\lambda_{ср1}$ составляет

$$\frac{44 - 42,3}{44} \cdot 100 = 3,86\%,$$

поэтому пересчитывать не будем. Если же эта разница превысит 10%, следует выполнить дополнительные расчеты при новом значении числа Bi_1 , рассчитанном с $\lambda_{ср1}'$.

Перепад температур по сечению слитка в конце первого интервала нагрева:

$$\Delta t_{1к} = t_{п1к} - t_{ц1к} = 700 - 522 = 178^\circ\text{C}.$$

Средняя температура по сечению слитка в конце первого интервала:

$$t_{ср1к} = t_{ц1к} + \frac{1}{2} \Delta t_{1к} = 522 + \frac{1}{2} 178 = 611^\circ\text{C}.$$

Среднюю температуру по сечению пластины определяют по формуле

$$t_{ср} = t_{ц} + \frac{1}{3} \Delta t.$$

Расчетная теплоемкость стали в первом интервале нагрева

$$c_{р1} = \frac{i_{t_{ср1к}} - i_{t_{ср1н}}}{t_{ср1к} - t_{ср1н}} = \frac{i_{611} - i_{20}}{611 - 20} = \frac{350 - 10}{611 - 20} = 0,58 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град},$$

где i — теплоемкость стали при соответствующей температуре. Значения i находим из графика на рис. 6.

Среднее значение коэффициента температуропроводности в первом интервале нагрева

$$a_{ср1} = \frac{\lambda_{ср1}}{c_{р1} \rho} = \frac{44}{580 \cdot 7850} = 96 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 0,035 \text{ м}^2/\text{ч},$$

где ρ — плотность стали, кг/м^3 . Поскольку плотность стали мало зависит от температуры, будем считать $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3 = \text{const}$ для всего времени нагрева слитков.

Время нагрева в первом интервале согласно (31):

$$\tau_1 = \frac{Fo_1 \cdot R^2}{a_{ср1}} = \frac{0,51 \cdot (0,5)^2}{0,035} = 3,64 \text{ ч}.$$

Температура газа в начале нагрева по (16):

$$t_{г1н} = \sqrt[4]{\frac{q_{1н}}{c_{гм}} + \left(\frac{T_{п1н}}{100}\right)^4} - 273 = \\ = 100 \sqrt[4]{\frac{71359}{2,76} + \left(\frac{20+273}{100}\right)^4} - 273 = 996^\circ\text{C}.$$

Температура газа в конце первого интервала нагрева:

$$t_{г1к} = 100 \sqrt[4]{\frac{37722}{3,0} + \left(\frac{700+273}{100}\right)^4} - 273 = 938^\circ\text{C}.$$

Температура кладки в начале нагрева в соответствии с (16):

$$t_{кл1н} = 100 \sqrt[4]{\frac{q_{1н}}{c_{км}} + \left(\frac{T_{п1н}}{100}\right)^4} - 273 = 100 \sqrt[4]{\frac{71359}{5,17} + \left(\frac{20+273}{100}\right)^4} - 273 = 813^\circ\text{C}.$$

Температура кладки в конце первого интервала нагрева:

$$t_{кл1к} = 100 \sqrt[4]{\frac{37722}{5,17} + \left(\frac{700+273}{100}\right)^4} - 273 = 856^\circ\text{C}.$$

Расчет второго интервала

Порядок проведения расчета режима нагрева металла для второго интервала такой же, как и для первого:

$$q_{2H} = q_{1K} = 37722 \text{ Вт/м}^2 ;$$

$$q_{2K} = 1,1 \cdot 3,44 \left[\left(\frac{900 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{850 + 273}{100} \right)^4 \right] = 11455 \text{ Вт/м}^2 ;$$

$$\alpha_{2H} = \alpha_{1K} = 187 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} ;$$

$$\alpha_{2K} = \frac{11455}{900 - 850} = 229 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} ;$$

$$\alpha_{cp2} = \frac{187 + 229}{2} = 208 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} ;$$

$$\lambda_{cp2} = \frac{\lambda_{700} + \lambda_{522} + \lambda_{850}}{3} = \frac{30 + 37 + 25}{3} = 30,7 \text{ Вт/м} \cdot \text{град} ;$$

$$Bi_2 = \frac{208 \cdot 0,5}{30,7} = 3,39 ;$$

$$\theta_{п2K} = \frac{t_{пч} - t_{п2K}}{t_{пч} - t_{cp1K}} = \frac{900 - 850}{900 - 611} = 0,17 ;$$

$$Fo_2 = -\frac{1}{3,37} \ln \frac{0,17}{0,4589} = 0,295 ;$$

$$\theta_{ц2K} = 1,4389 \cdot e^{-3,37 \cdot 0,295} = 0,53 ;$$

$$t_{ц2K} = t_{пч} - \theta_{ц2K} (t_{пч} - t_{cp1K}) = 900 - 0,53(900 - 611) = 747^\circ \text{C} ;$$

$$\lambda'_{cp2} = \frac{\lambda_{700} + \lambda_{522} + \lambda_{850} + \lambda_{747}}{4} = \frac{30 + 37 + 25 + 27}{4} = 29,75 \text{ Вт/м} \cdot \text{град} .$$

34

Разница между значениями λ'_{cp2} и λ_{cp2} составляет:

$$\frac{30,7 - 29,75}{30,7} \cdot 100 = 3,1\% ,$$

поэтому уточняющий расчет выполнять нет необходимости

$$\Delta t_{2K} = 850 - 747 = 103^\circ \text{C} ;$$

$$t_{cp2K} = 747 + \frac{1}{2} \cdot 103 = 799^\circ \text{C} ;$$

$$c_{p2} = \frac{i_{799} - i_{611}}{799 - 611} = \frac{540 - 350}{799 - 611} = 1,01 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град} ;$$

$$a_{cp2} = \frac{30,7}{1010 \cdot 7850} = 38 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 0,014 \text{ м}^2/\text{ч} ;$$

$$\tau_2 = \frac{0,295 \cdot (0,5)^2}{0,014} = 5,27 \text{ ч} ;$$

$$t_{г2H} = t_{г1K} = 938^\circ \text{C} ;$$

$$t_{г2K} = 100 \sqrt[4]{\frac{11455}{3,0} + \left(\frac{850 + 273}{100} \right)^4} - 273 = 912^\circ \text{C} ;$$

$$t_{кл2H} = t_{кл1K} = 856^\circ \text{C} ;$$

$$t_{кл2K} = 100 \sqrt[4]{\frac{11455}{5,17} + \left(\frac{850 + 273}{100} \right)^4} - 273 = 887^\circ \text{C} .$$

Общее время нагрева в первом периоде:

$$\tau_H = \tau_1 + \tau_2 = 3,64 + 5,27 = 8,91 \text{ ч} .$$

35

Второй период нагрева

Нагрев происходит при условии $t_n = 850^\circ\text{C} = \text{const}$ (т.е. при граничных условиях первого рода) для выравнивания температур по сечению слитка от $\Delta t_n = 103^\circ\text{C}$ в конце первого периода нагрева до заданного значения $\Delta t_k = 10^\circ\text{C}$.

Время выравнивания температур по сечению цилиндра радиуса R найдем из формулы (38):

$$\tau_B = -\frac{R^2}{5,76 \cdot a} \cdot \ln \frac{\Delta t_k}{1,11 \cdot \Delta t_n} \quad (45)$$

Время выравнивания температур по сечению пластины толщиной $\delta = 2S$ определяем из выражения (37):

$$\tau_B = -\frac{S^2}{2,47 \cdot a} \cdot \ln \frac{\Delta t_k}{1,03 \Delta t_n} \quad (46)$$

Среднее значение коэффициента теплопроводности во втором периоде нагрева:

$$\lambda_{срв} = \frac{\lambda_{850} + \lambda_{747} + \lambda_{850} + \lambda_{840}}{4} = \frac{25 + 27 + 25 + 25}{4} = 25,5 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$$

Средняя температура по сечению слитка в конце нагрева (в конце периода выдержки):

$$t_{срв} = 840 + \frac{1}{2} \Delta t_k = 840 + 0,5 \cdot 10 = 845^\circ\text{C}$$

Расчетная теплоемкость во втором периоде нагрева:

$$C_{рв} = \frac{i_{845} - i_{799}}{845 - 799} = \frac{565 - 540}{845 - 799} = 0,54 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$$

Среднее значение коэффициента температуропроводности в период выравнивания температур:

$$\alpha_B = \frac{25,5}{540 \cdot 7850} = 60 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 0,022 \text{ м}^2/\text{ч}$$

По формуле (45) определяем продолжительность периода выравнивания температур:

$$\tau_B = -\frac{(0,5)^2}{5,76 \cdot 0,022} \cdot \ln \frac{10}{1,11 \cdot 103} = 4,81 \text{ ч}$$

Тепловой поток на поверхность металла в конце периода выдержки:

$$q_k = \frac{2 \cdot \lambda_k \Delta t_k}{R} = \frac{2 \cdot 25 \cdot 10}{0,5} = 1000 \text{ Вт/м}^2$$

Температура газов в печи в конце выдержки:

$$t_{гв} = 100 \sqrt[4]{\frac{1000}{3,1} + \left(\frac{850 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 856^\circ\text{C}$$

Температура печи в конце выдержки:

$$t_{пчв} = 100 \sqrt[4]{\frac{1000}{3,44} + \left(\frac{850 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 855^\circ\text{C}$$

Температура кладки в конце выдержки:

$$t_{кль} = 100 \sqrt[4]{\frac{1000}{5,17} + \left(\frac{850 + 273}{100}\right)^4} - 273 = 853^\circ\text{C}$$

Общее время нагрева слитков:

$$\tau = \tau_H + \tau_B = 8,91 + 4,81 = 13,72 \text{ ч}$$

Результаты расчета сведены в табл. 8 и представлены на рис. 7.

Общая масса садки в печи:

$$E = V_M \rho = 3,14 \cdot 7850 = 24649 \text{ кг}$$

Производительность печи:

$$G = \frac{E}{\tau} = \frac{24649}{13,72} = 1797 \text{ кг/ч}$$

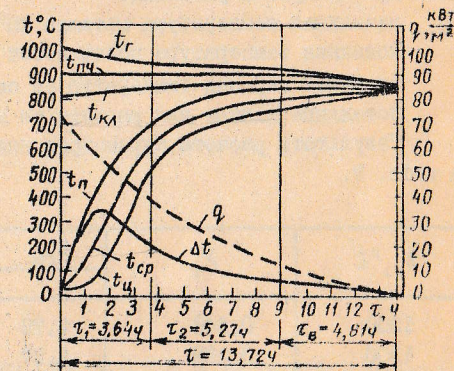


Рис. 7. График нагрева слитков диаметром 1000 мм и длиной 2000 мм из стали 40 под термообработку ($t_n = 850^\circ\text{C}$; $\Delta t_k = 10^\circ\text{C}$)

Напряженность пода печи:

$$\rho = \frac{G}{F_{\text{под}}} = \frac{1797}{2,5 \cdot 5,1} = 141 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Т а б л и ц а 8

Результаты расчета нагрева ($^{\circ}\text{C}$) металла под термообработку

Время ч	$t_{\text{ц}}$	$t_{\text{ср}}$	$t_{\text{п}}$	$t_{\text{кл}}$	$t_{\text{пч}}$	$t_{\text{г}}$	$q_{\text{пов}}$ Вт/м ²
$\tau = 0$	20	20	20	813	900	996	71359
$\tau_1 = 3,64$	522	611	700	856	900	938	37722
$\tau_2 = 5,27$	747	799	850	887	900	912	11455
$\tau_3 = 4,81$	840	845	850	853	855	856	1000

РАСЧЕТ РЕЖИМА НАГРЕВА МЕТАЛЛА ПОД ОБРАБОТКУ ДАВЛЕНИЕМ

Рассмотрим пример расчета нагрева металла под обработку давлением при следующих условиях:

начальная температура металла 20°C ;

конечная температура поверхности слитков 1200°C ;

конечный перепад температур по сечению слитков 50°C .

Остальные данные для расчета те же, что и в предыдущем задании.

Результаты расчета параметров внешнего теплообмена приведены

в табл. 9.

Т а б л и ц а 9

$t_{\text{г}}, ^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_{\text{г}}$	$C_{\text{ГМ}}$	$C_{\text{КМ}}$	$C_{\text{ПМ}}$
		Вт/м ² · К ⁴		
1200	0,248	2,78	5,09	3,44
1300	0,229	2,67	5,10	
1400	0,203	2,50	5,12	

Принимаем следующий режим нагрева:

первый период - нагрев при постоянной температуре печи $t_{\text{пч}} = 1250^{\circ}\text{C} = \text{const}$;

второй период - выравнивание температур при постоянной температуре поверхности $t_{\text{п}} = 1200^{\circ}\text{C} = \text{const}$.

Первый период разобьем на три интервала по температуре поверхности:

первый интервал: от $t_{\text{п1н}} = 20^{\circ}\text{C}$ до $t_{\text{п1к}} = 800^{\circ}\text{C}$;

второй интервал: от $t_{\text{п2н}} = 800^{\circ}\text{C}$ до $t_{\text{п2к}} = 1000^{\circ}\text{C}$;

третий интервал: от $t_{\text{п3н}} = 1000^{\circ}\text{C}$ до $t_{\text{п3к}} = 1200^{\circ}\text{C}$.

Конечный перепад температур по сечению слитков $\Delta t_{\text{к}} = 50^{\circ}\text{C}$.

Температура печи в первом периоде нагрева выше допустимой по термическим напряжениям $t_{\text{пч доп}} = 926^{\circ}\text{C}$. Это приведет к тому, что в процессе нагрева перепады температур по сечению слитков превысят $\Delta t_{\text{доп}} = 403^{\circ}\text{C}$.

Сталь 40 относится к мягким сталям, обладающим высокой пластичностью, скорость нагрева которых не ограничивается, следовательно, такой режим нагрева для нее не опасен.

Порядок расчета нагрева металла такой же, как и в предыдущем задании, поэтому приведем только конечные результаты расчета.

Первый интервал.

$$q_{1\text{н}} = 203308 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{1\text{к}} = 153428 \text{ Вт/м}^2.$$

$$\alpha_{1\text{н}} = 165 \text{ Вт/м}^2 \text{ град.}$$

$$\alpha_{1\text{к}} = 341 \text{ Вт/м}^2 \text{ град.}$$

$$\alpha_{\text{ср1}} = 253 \text{ Вт/м}^2 \text{ град.}$$

$$\lambda_{\text{ср1}} = 42,3 \text{ Вт/м град.}$$

$$Bi_1 = 2,99.$$

$$\theta_{\text{п1к}} = 0,366.$$

По графику на рис. 3 находим $F_{01} = 0,12$, а из рис. 5 - $\theta_{\text{ц1к}} = 0,9$,

$$t_{\text{ц1к}} = 143^{\circ}\text{C}, \quad \lambda'_{\text{ср1}} = 44 \text{ Вт/м град.}$$

Разница между $\lambda'_{\text{ср}}$ и $\lambda_{\text{ср}}$ составляет 4,02%, поэтому уточняющий расчет не проводим.

$$\Delta t_{1к} = 657^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{ср1к} = 472^{\circ}\text{C}.$$

$$C_{p1} = 0,53 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$$

$$a_{ср1} = 101 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 0,036 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

$$\tau_1 = 0,83 \text{ ч}.$$

$$t_{г1н} = 1416^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{г1к} = 1357^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{кл1н} = 1142^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{кл1к} = 1170^{\circ}\text{C}.$$

Второй интервал.

$$q_{2н} = 153428 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{2к} = 104215 \text{ Вт/м}^2.$$

$$\alpha_{2н} = 341 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град.}$$

$$\alpha_{2к} = 417 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град.}$$

$$\alpha_{ср2} = 379 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град.}$$

$$\lambda_{ср2} = 33,83 \text{ Вт/м}\cdot\text{град.}$$

$$Bi_2 = 5,60.$$

$$\theta_{п2к} = 0,32.$$

По графикам на рис. 3 и 5 находим:

$$F_{02} = 0,06.$$

$$\theta_{ц2к} = 0,098.$$

$$t_{ц2к} = 488^{\circ}\text{C}.$$

$$\lambda'_{ср2} = 34,75 \text{ Вт/м}\cdot\text{град.}$$

Уточняющий расчет не выполняем

$$\Delta t_{2к} = 512^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{ср2к} = 744^{\circ}\text{C}.$$

$$C_{p2} = 0,81 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$$

$$a_{ср2} = 53 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 0,019 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

$$\tau_2 = 0,79 \text{ ч}.$$

$$t_{г2н} = 1357^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{г2к} = 1326^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{кл2н} = 1170^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{кл2к} = 1198^{\circ}\text{C}.$$

Третий интервал

$$q_{3н} = 104215 \text{ Вт/м}^2.$$

$$q_{3к} = 25447 \text{ Вт/м}^2.$$

$$\alpha_{3н} = 417 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град.}$$

$$\alpha_{3к} = 509 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град.}$$

$$\alpha_{ср3} = 463 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град.}$$

$$\lambda_{ср3} = 31,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{град.}$$

$$Bi_3 = 7,35.$$

$$\theta_{п3к} = 0,1.$$

По графикам находим:

$$F_{03} = 0,25.$$

$$\theta_{ц3к} = 0,5.$$

$$t_{ц3к} = 997^{\circ}\text{C}.$$

$$\lambda'_{ср3} = 30,4 \text{ Вт/м}\cdot\text{град.}$$

Выполнять уточняющий расчет нет необходимости.

$$\Delta t_{3к} = 203^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{ср3к} = 1099^{\circ}\text{C}.$$

$$C_{p3} = 0,69 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$$

$$a_{ср3} = 58 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 0,021 \text{ м}^2/\text{ч}.$$

$$\tau_3 = 2,99 \text{ ч}.$$

$$t_{г3н} = 1326^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{г3к} = 1270^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{\text{клзн}} = 1198^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{\text{клзк}} = 1238^{\circ}\text{C}.$$

$$\tau_{\text{н}} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 = 0,83 + 0,79 + 2,99 = 4,61 \text{ ч.}$$

Второй период нагрева

$$\Delta t_{\text{н}} = 203^{\circ}\text{C}.$$

$$\Delta t_{\text{к}} = 50^{\circ}\text{C}.$$

$$\lambda_{\text{срв}} = 28,63 \text{ Вт/м}\cdot\text{град.}$$

$$t_{\text{срв}} = 1175^{\circ}\text{C}.$$

$$C_{\text{рв}} = 0,59 \text{ кДж/кг}\cdot\text{град.}$$

$$a_{\text{в}} = 61 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с} = 0,022 \text{ м}^2/\text{ч.}$$

$$\tau_{\text{в}} = 2,97 \text{ ч.}$$

$$q_{\text{к}} = 5700 \text{ Вт/м}^2.$$

$$t_{\text{гв}} = 1216^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{\text{пчв}} = 1213^{\circ}\text{C}.$$

$$t_{\text{квв}} = 1209^{\circ}\text{C}.$$

$$\tau = \tau_{\text{н}} + \tau_{\text{в}} = 4,61 + 2,97 = 7,58 \text{ ч.}$$

$$G = 3254 \text{ кг/ч.}$$

$$P = 255 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч.}$$

Результаты расчета нагрева металла под обработку давлением сведены в табл. 10 и представлены в виде графика на рис. 8.

Т а б л и ц а 10

Результаты расчета режима нагрева ($^{\circ}\text{C}$) металла под обработку давлением

Время, ч	$t_{\text{ц}}$	$t_{\text{ср}}$	$t_{\text{н}}$	$t_{\text{кл}}$	$t_{\text{пч}}$	$t_{\text{г}}$	$q_{\text{пов}}, \text{Вт/м}^2$
$\tau = 0$	20	20	20	1142	1250	1416	203308
$\tau_1 = 0,83$	143	472	800	1170	1250	1357	153428
$\tau_2 = 0,79$	488	744	1000	1198	1250	1326	104215
$\tau_3 = 2,99$	997	1099	1200	1238	1250	1270	25447
$\tau_{\text{в}} = 2,97$	1150	1175	1200	1209	1213	1216	5700

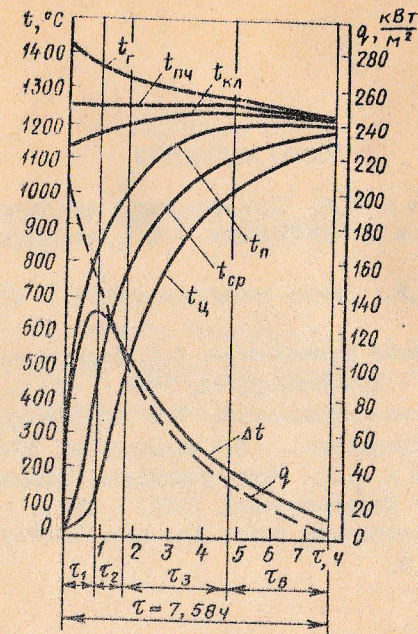


Рис. 8. График нагрева слитков диаметром 1000 мм и длиной 2000 мм из стали 40 под обработку давлением ($t_{\text{н}} = 1200^{\circ}\text{C}$; $\Delta t_{\text{к}} = 50^{\circ}\text{C}$)

Дальнейшие расчеты тепловой работы печи, включающие расчет ее теплового баланса, аэродинамические расчеты, а также расчет основных рабочих параметров рекуператора, изложены в методических указаниях "Расчет теплового баланса и рекуператора. Аэродинамические расчеты камерных садочных печей" (авторы: В.И.Становой, А.А.Буйлов. - Л.: ЛПИ, 1989).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К а з а н ц е в Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. - М.: Metallurgy, 1975. - 368 с.
2. Л ы к о в А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.
3. Metallургическая теплотехника. Т.1. Теоретические основы /Под ред. В.А.Кривандина. - М.: Metallurgy, 1986. - 424 с.
4. Metallургическая теплотехника. Т.2. Конструкция и работа печей /Под ред. В.А.Кривандина. - М.: Metallurgy, 1986. - 592 с.
5. П у г о в к и н А.У. Рециркуляционные пламенные печи в машиностроении. - Л.: Машиностроение, 1987. - 158 с.
6. Расчеты нагревательных печей /Под ред. Н.Ю.Тейна. - Киев: Техника, 1969. - 540 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Исходные данные и порядок расчета камерных садочных печей	5
Расчет горения топлива	7
Расчет параметров внешнего теплообмена	13
Расчет режима нагрева металла под термообработку . .	20
Расчет режима нагрева металла под обработку давлением.	38
Список литературы.	44