

## **ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ МАРОК СТАЛЕЙ В ПЕЧАХ С МЕХАНИЗИРОВАННЫМ ПОДОМ РУП «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

**Докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,  
кандидаты техн. наук ФИЛИППОВ В. В., ТРУСОВА И. А.,  
инженеры ПИРОГОВ А. А., КАБИШОВ С. М.**

*Белорусская государственная политехническая академия,  
Республиканское унитарное предприятие  
«Белорусский металлургический завод»*

Анализ мирового опыта производства высокопрочной кордовой нити показывает, что в данной области металлургических технологий необходимо освоение производства новых марок сталей с повышенным содержанием углерода. В связи с тем, что РУП «Белорусский металлургический завод» постепенно переходит от традиционных марок кордовой стали (70К, 75К) к производству кордовой стали 80К–90К [1, 2], специалисты РУП «БМЗ» и БГПА продолжили серию исследований теплотехнологических процессов при тепловой обработке кордовых марок сталей (80К) в газопламенных нагревательных печах станов 850 и 320. В ранее опубликованных работах (например, [3, 4]) приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований тепловой работы печей, базирующихся на математическом моделировании сопряженного теплообмена. В итоге проведенных на тот период времени (1990–1994 гг.) исследований разработаны рациональные теплотехнологические режимы нагрева различных марок сталей, в том числе и стали марки 70К, которые внедрены в производство. Вместе с тем следует отметить то обстоятельство, что увеличение производства металлопродукции в условиях БМЗ в среднем на 3–5 % ежегодно приводит к необходимости интенсификации технологических процессов и увеличения производительности действующего оборудования, которое не подлежит реконструкции по ряду причин. К такому типу оборудования относятся нагревательные печи станов 320 и 850.

Ниже изложены новые результаты комплексных экспериментально-теоретических исследований при производстве кордовых марок сталей с повышенным содержанием углерода, и в первую очередь данные промышленных экспериментов по нагреву непрерывнолитых заготовок, при увеличении производительности печей станов 320 и 850.

Нагревательная печь стана 320 РУП «БМЗ» предназначена для нагрева непрерывнолитых заготовок из углеродистых, низколегированных, конструкционных и кордовых марок сталей сечением 125×125 мм и длиной до 12,0 м при шаге раскладки от 200 до 400 мм. Печь (рис. 1) оснащена механизированным подом, который составляют два участка (шагающих балок и шагающего пода) и имеет семь зон автоматического регулирования. Посад и выдача металла боковые. Общая длина печи – 29,2 м. В технологических зонах печи расположено 102 горелки (96 сводовых плоскофакельных и 6 длиннофакельных). Максимальная температура подогрева воздуха в металлургическом рекуператоре составляет 450 °С.

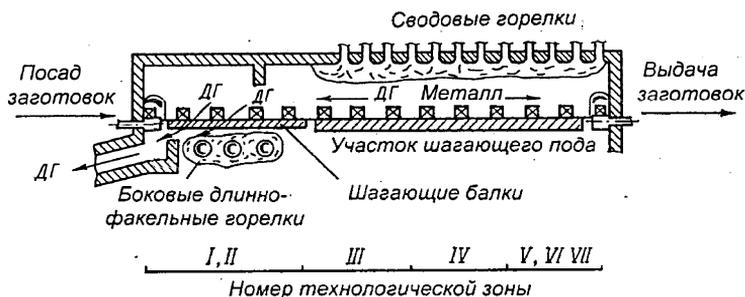


Рис. 1. Схема нагревательной печи стана 320 РУП «БМЗ»

Нагревательная печь стана 850 (рис. 2) с шагающими балками предназначена для нагрева непрерывнолитых заготовок сечением  $0,250 \times 0,300$  и  $0,300 \times 0,400$  м длиной от 2,5 до 5,5 м при шаге раскладки соответственно 150 и 200 мм. Посад и выдача металла производятся соответственно с торцов печи. Общая длина установки 23 м, по расположению горелок она разделена на 7 зон. Нагрев металла осуществляется в нижних зонах 18 боковыми длиннофакельными горелками, в верхних — сводовыми плоскопламенными горелками (27 штук). Для утилизации теплоты уходящих газов используется металлический рекуператор, в котором идущий на горелки воздух нагревается до температур порядка  $450\text{--}550$  °С.

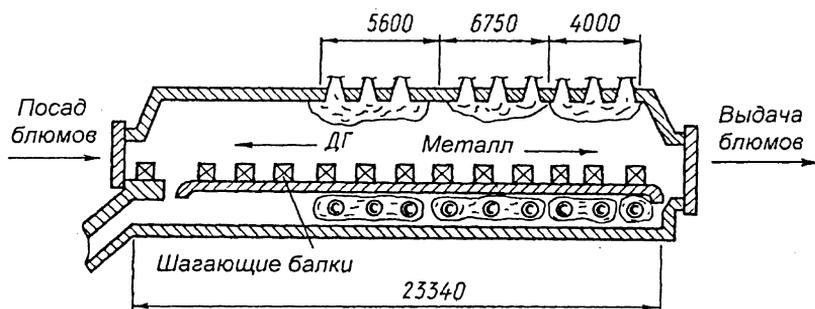


Рис. 2. Схема нагревательной печи стана 850 РУП «БМЗ»

На первом этапе исследований теплотехнологических процессов производства высокоуглеродистых кордовых марок сталей разработана методика промышленного эксперимента, позволяющая измерять температурное поле в четырех наиболее характерных точках сечения непрерывнолитой заготовки (температуры центра, поверхности верхней и нижней граней, ребра), а также температуру греющей среды. Схема установки термопар в фиксированных точках сечения заготовки и специальной термопары для измерения температуры греющей среды, горячий спай которой отстоит на расстоянии 50–80 мм от верхней поверхности опытной заготовки, приведена на рис. 3. Измерение температур осуществлялось с использованием хромель-алюмелевых термопар диаметрами электродов 0,5 мм. Свободные спаи защищались керамическими изоляторами с бусами. Жгут проводов покрывался слоем асбеста для предохранения от механических поврежде-

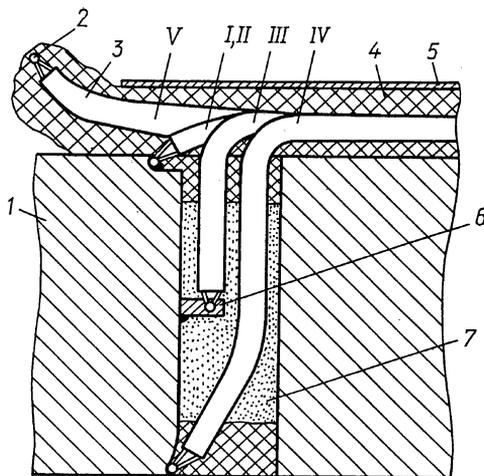


Рис. 3. Методика установки и закрепления термодатчиков: 1 – заготовка; 2 – слай термодатчика; 3 – двухканальная алундовая изоляция; 4 – каолиновая вата; 5 – уголок или тавр; 6 – планка; 7 – безводная окись алюминия; I, II – термопары, измеряющие температуры грани и ребра (верхняя поверхность); III – центр; IV – грань; V – температура среды

ний в начальной стадии эксперимента и каолиновой ватой для защиты от тепловых потоков горелок. Затем термоэлектроды выводились со стороны посадки заготовок и подключались к самопишущему вторичному прибору, в качестве которого использовался электронный потенциометр типа ЭПП-09. Перед проведением эксперимента потенциометр был оттарирован по температурам кристаллизации чистых металлов. Максимальная погрешность прибора составила  $5^\circ$ . На рис. 4 приведены результаты по термометрированию непрерывнолитых заготовок из стали 80К сечением  $0,250 \times 0,300$  мм и  $0,125 \times 0,125$  мм при нагреве в печах станов 850 и 320 соответственно. Здесь очевидно, что при нагреве заготовок сечением  $0,250 \times 0,300$  мм в печи стана 850 имеет место незначительная несимметричность нагрева, которая наблюдается в первых двух зонах печи по ходу движения металла (методической неотопливаемой и первой отопливаемой). При этом температура нижней поверхности заготовки на  $50\text{--}70^\circ$  выше верхней. К окончанию нагрева температуры верхней и нижней поверхностей выравниваются и находятся на уровне  $1170\text{--}1180^\circ\text{C}$ . Максимальный температурный перепад (между центральной плоскостью и ребром заготовки) наблюдается в районе фазовых превращений стали и находится на уровне  $180\text{--}200^\circ\text{C}$ , к моменту выдачи заготовки из печи перепад температур равен  $30\text{--}40^\circ\text{C}$ , что соответствует требованиям технологической инструкции. При нагреве мелкосортных заготовок (сечением  $0,125 \times 0,125$  мм) в печи стана 320 имеет место практически симметричный нагрев верхней и нижней поверхностей независимо от производительности печи. В процессе нагрева наблюдаются два максимума перепадов температур между центральной плоскостью и ребром заготовки: в начале нагрева (порядка  $160\text{--}200^\circ\text{C}$ ) и при перлитном превращении ( $100\text{--}120^\circ\text{C}$ ). В процессе проведения эксперимента фиксировались все основные показатели тепловой работы нагревательной печи, что позволило установить фактический тепловой баланс за период проведения экспериментов (табл. 1, 2). Данные, приведенные в таблицах, свидетельствуют о том, что термический КПД печей находится на уровне  $56\text{--}64\%$ , удельный расход условного топлива – в пределах  $48\text{--}50$  кг у. т./т при нагреве в печи стана 850 и  $46\text{--}47$  кг у. т./т при нагреве в печи стана 320. От-

меченное обстоятельство свидетельствует об имеющихся резервах и дает основания для проведения теоретических исследований, направленных на усовершенствование температурно-тепловых режимов при производстве кордовых марок сталей с повышенным содержанием углерода.

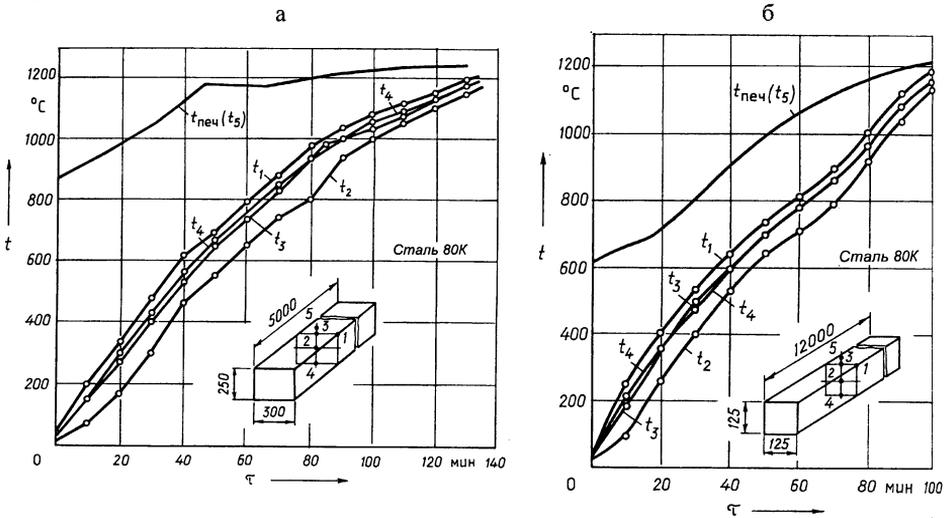


Рис. 4. Изменение температуры в характерных точках сечения непрерывнолитых заготовок: а – размером  $0,250 \times 0,300$  м в печи стана 850 производительностью  $P = 69$  т/ч; б – размером  $0,125 \times 0,125$  м в печи стана 320 производительностью  $P = 62$  т/ч

При математическом моделировании процессов нагрева непрерывнолитых заготовок в печах отмеченной конструкции учитывали специфику конструкции рассматриваемых печей и условия их функционирования, а также результаты экспериментальных исследований, приведенные выше. С этой целью по аналогии с ранее опубликованными работами [3–5] сформулировали сопряженные математические модели нагрева заготовок в печах (внешняя и внутренняя задачи теплообмена), в которых рассматривали расположение горелок, геометрию и шаг раскладки заготовок, сопряженность температурных полей металла и печного пространства, наличие конвективного переноса теплоты, селективность излучения и т. д.

Рассмотрим модель сопряженного теплообмена в печи стана 320. Учитывая результаты экспериментальных исследований (практически симметричный нагрев сверху и снизу), сформулируем сопряженную задачу для половины (по высоте) печи (рис. 5).



Рис. 5. Расчетная схема первого этапа решения сопряженной задачи теплообмена для печи с шагающими балками и шагающим подом стана 320/150

## Тепловой баланс нагревательной печи стана 850

Производительность 69 т/ч, суммарный расход топлива 2885 м <sup>3</sup> /ч							
№	Наименование статьи	кВт	%	№	Наименование статьи	кВт	%
Приход теплоты				Расход теплоты			
1	Теплота от горения топлива	27787,8	82,55	1	Теплота, затраченная на нагрев металла	15810	47,61
2	Теплота, вносимая подогретым воздухом	4659,24	13,84	2	Теплота, уносимая продуктами сгорания	12264,4	36,93
3	Теплота, вносимая топливом	24,34	0,07	3	Потери теплоты теплопроводностью через кладку	2320,0	7,0
4	Теплота экзотермических реакций окисления железа	1191,2	3,54	4	Потери теплоты излучением через открытые отверстия	582,57	1,75
				5	Потери теплоты с окалиной	349,25	1,05
				6	Потери теплоты с охлаждающей водой	1350,1	4,07
				7	Неучтенные потери	531,6	1,6
Всего		33662,6	100	Всего		33207,9	100

Удельный расход условного топлива  $b = 49,52$  кг у.т./т, КПД = 56,9 %, КИТ = 72,6 %

## Тепловой баланс нагревательной печи стана 320

Производительность 62 т/ч, суммарный расход топлива 2450 м <sup>3</sup> /ч							
№	Наименование статьи	кВт	%	№	Наименование статьи	кВт	%
Приход теплоты				Расход теплоты			
1	Теплота от горения топлива	23350,0	78,4	1	Теплота, затраченная на нагрев металла	13787,1	46,2
2	Теплота, вносимая подогретым воздухом	5670,0	18,9	2	Теплота, уносимая продуктами сгорания	10994,0	36,85
3	Теплота, вносимая топливом	20,67	0,07	3	Потери теплоты теплопроводностью через кладку	2416,0	8,1
4	Теплота экзотермических реакций окисления железа	947,2	3,16	4	Потери теплоты излучением через открытые отверстия	558,8	1,87
				5	Потери теплоты с окалиной	394,15	1,32
				6	Потери теплоты с охлаждающей водой	1319,1	4,42
				7	Неучтенные потери	359,6	1,24
Всего		29987,9	100	Всего		29838,8	100

Удельный расход условного топлива  $b = 46,22$  кг у. т./т, КПД = 59,0 %, КИТ = 77,2 %

В качестве параметров математической модели сопряженного теплообмена будем рассматривать следующие величины:

геометрические параметры – размеры заготовок, высота свода печи, длина методической, сварочной, томильной зон;

технологические параметры – начальная температура металла, производительность печи, расходы топлива и воздуха, теплота сгорания топлива, распределение расхода топлива по зонам печи, температура подогрева топлива и воздуха, состав основных продуктов сгорания топлива, коэффициенты теплоотдачи к поверхности кладки и металла, расстояние от факела до металла, толщина зон горения, степень черноты поверхности металла и кладки, предельно допустимая температура нагрева металла по зонам печи;

теплофизические параметры – коэффициенты в формулах, аппроксимирующих зависимости теплопроводности, теплоемкости, плотности металла, продуктов сгорания от температуры.

Величины, определяемые в результате решения сопряженной задачи теплообмена: температурные поля по сечению заготовки и в рабочем пространстве печи, тепловой поток и коэффициенты теплообмена по длине печи, время нагрева, удельный расход топлива.

Для упрощения математической модели примем некоторые допущения, характерные для подобных задач:

температура металла, кладки и дымовых газов постоянна по ширине печи;

плотность потока тепловых потерь через кладку приближенно равна плотности потока конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности футеровки, поэтому лучистую составляющую результирующего теплового потока на этой поверхности примем равной нулю;

для всех поверхностных зон металла и кладки соответствующие коэффициенты конвективной теплоотдачи имеют постоянные значения;

состав продуктов сгорания постоянен по всему печному пространству, и их средняя удельная теплоемкость не зависит от температуры.

Очевидно, что дискретный характер расположения заготовок приводит к необходимости решения задачи радиационно-кондуктивного теплообмена для системы сложной конфигурации.

По аналогии с ранее изложенными принципами моделирования сопряженного теплообмена при расположении заготовок с зазором [3, 4] применим двухэтапный метод расчета. На первом этапе дискретная поверхность заготовок заменяется условной плоскостью, что позволяет построить и реализовать традиционную зональную модель теплообмена. Характер отопления печи (боковое в зоне шагающего пода и сводовое в зоне шагающих балок) определяет расположение в представленной на рис. 5 расчетной схеме зон горения, а также основные направления движения газов.

Как отмечалось в ранее опубликованных работах [3–5], касающихся вопросов моделирования сопряженного теплообмена в печах различного конструктивного оформления, в каждом конкретном случае требуется индивидуальный подход при дискретизации области печного пространства на расчетные зоны. При исследовании тепловой работы нагревательной печи стана 320 рабочее пространство разбиваем на пять расчетных участков, при

этом общее число расчетных зон при реализации первого этапа решения составляет 24 (рис. 5).

Модель внешнего лучисто-конвективного теплообмена для зон II рода сводится к системе нелинейных алгебраических уравнений теплового баланса

$$\sum_{k=1}^N (a_{ki}^{\Sigma} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^0 + Q_i^v = 0, \quad i \in N_2,$$

где  $N$  – общее число зон (для конкретного примера  $N = 24$ );  $N_2$  – множество номеров зон II рода ( $N_2 = \overline{6, 24}$ ).

Тепловые потоки на поверхности металла вычисляются по явным формулам

$$Q_i = \sum_{k=1}^N (a_{ki}^{\Sigma} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^0, \quad i \in N_1,$$

где  $N_1$  – множество номеров узлов зон I рода ( $N_1 = \overline{1, 5}$ ).

Коэффициенты радиационного  $a_{ki}^{\Sigma}$  и конвективного теплообмена  $g_i^0$ , а также мощность тепловыделения  $Q_i^v$  в зонах горения топлива определяются в соответствии с методикой, изложенной в [4, 5].

Для решения внутренней задачи теплообмена использовано традиционное уравнение теплопроводности с соответствующими граничными условиями. На первом этапе записывается одномерное уравнение теплопроводности, на втором – осуществляется корректировка результатов расчета первого этапа с учетом переизлучения между заготовками, лежащими на поду печи с зазором.

Аналогичным образом разработана математическая модель сопряженного теплообмена для нагревательной печи стана 850 с учетом ее конструктивных особенностей. В конкретном случае (двухсторонний нагрев заготовок) зональная модель теплообмена включает в себя верхнюю и нижнюю части печного пространства. Методическая зона печи неотапливаемая, поэтому в верхнем и нижнем строениях моделируется двумя зонами (рис. 6, зоны 13, 34). Для двух сварочных и томильной зон характерны различные системы нагрева металла. В верхнем строении печи отопление сводовое, поэтому она разбивается по высоте на две части (зоны 14–21). Снизу нагрев осуществляется боковыми длиннофакельными горелками, поэтому нижнее строение печи по высоте делится на три части (зоны 35–46). Разделение тракта печи на пять расчетных участков (один – методическая зона, по два – на сварочные и томильную зоны) представляется достаточным для учета динамики нагрева металла с приемлемой точностью.

Таким образом, данная дискретизация поверхностей металла, кладки и печного пространства привела к построению зональной модели теплообмена с 46-ю зонами.

Сформулированные математические задачи сопряженного теплообмена после конечно-разностной аппроксимации решены методом прогонки с помощью одной из неявных схем расщепления.

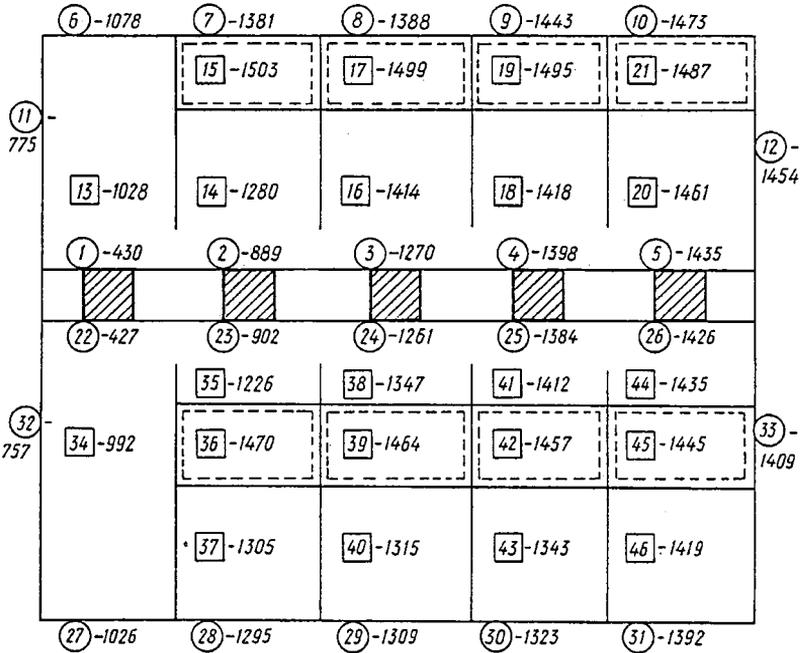


Рис. 6. Зональная модель теплообмена в нагревательной печи стана 850 (штриховыми линиями показаны зоны горения)

Тестирование разработанных математических моделей проводилось с использованием результатов промышленных экспериментов, представленных выше. Результаты идентификации приведены на рис. 7, из которого очевидна удовлетворительная сходимость расчетных и экспериментальных термограмм.

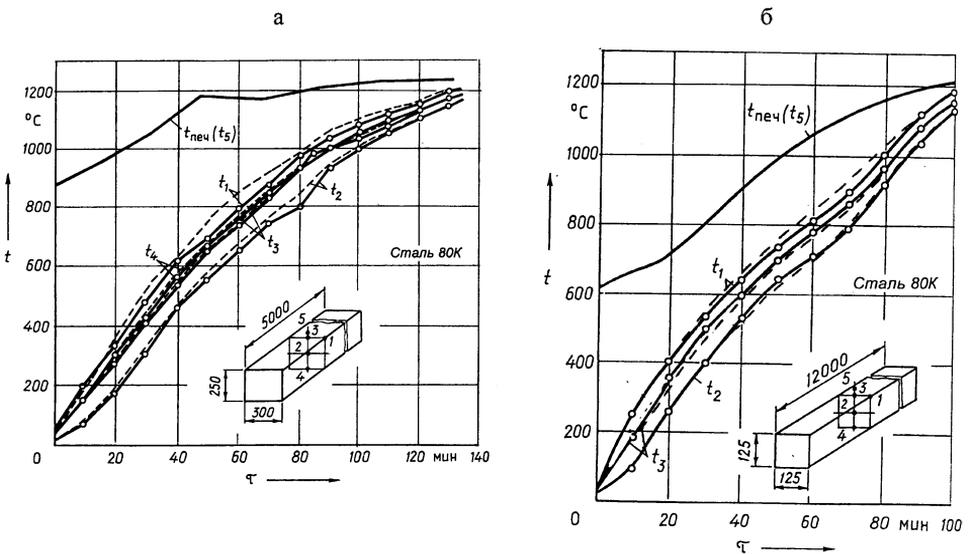


Рис. 7. Результаты сравнения расчетных (штриховые кривые) и экспериментальных (сплошные) значений температур в характерных точках сечения заготовки при нагреве в печи: а – стана 850; б – стана 320

На основе математической модели сопряженного теплообмена и данных промышленных экспериментов разработан программный продукт, который использован для отработки режимов газопламенных печных установок с механизированным подом при повышенных производительностях с целью увеличения пропускной способности и снижения удельного расхода условного топлива. При варьировании расхода природного газа, подаваемого на отопление печи стана 320, отработаны теплотехнические параметры печи при производительности 140–160 т/ч, что в сущности соответствует паспортным данным и максимальной производительности печи при нагреве высокоуглеродистых марок сталей (80К–90К). На рис. 8 приведены экспериментальные результаты апробации разработанного теплотехнологического режима при производительности 148 т/ч. Анализ основных показателей тепловой работы печи (табл. 3) показывает, что удельный расход условного топлива находится на уровне 42–45 кг у. т./т, коэффициент полезного действия – 63,6 %, коэффициент использования топлива – 77,5 %. При проверке адаптированного режима нагрева заготовок для производительности 155–160 т/ч удельный расход условного топлива соответствовал 38–40 кг у. т./т. Такая динамика дает основания утверждать о перспективности печей данной конструкции и целесообразности их строительства для нагрева длинномерных мелкосортных заготовок (0,08×0,08 – 0,16×0,16 м) при производительности 200–300 т/ч. Приведенные теплотехнические показатели тепловой работы печей соответствуют лучшему мировому уровню печных установок с механизированным подом, эксплуатирующихся на металлургических предприятиях Японии, Германии, Италии и др.

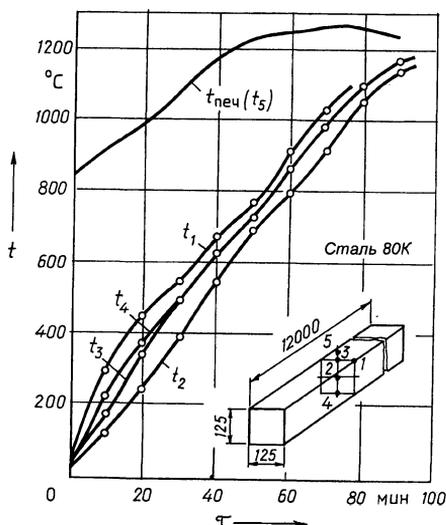


Рис. 8. Изменение температуры в характерных точках сечения непрерывнолитых заготовок размером 0,125×0,125 м при нагреве в печи стана 320 по разработанному режиму

## Тепловой баланс нагревательной печи стана 320

Производительность 148 т/ч, суммарный расход топлива 5428 м <sup>3</sup> /ч							
№	Наименование статьи	кВт	%	№	Наименование статьи	кВт	%
Приход теплоты				Расход теплоты			
1	Теплота от горения топлива	51731,9	77,25	1	Теплота, затраченная на нагрев металла	32900,4	50,25
2	Теплота, вносимая подогретым воздухом	12728,7	19,0	2	Теплота, уносимая продуктами сгорания	24388,0	37,25
3	Теплота, вносимая топливом	45,79	0,07	3	Потери теплоты теплопроводностью через кладку	4011,6	6,13
4	Теплота экзотермических реакций окисления железа	2466,7	3,68	4	Потери теплоты излучением через открытые отверстия	741,7	1,13
				5	Потери теплоты с окалиной	1026,7	1,57
				6	Потери теплоты с охлаждающей водой	1471,2	2,25
				7	Неучтенные потери	933,7	1,43
	Всего	66973,1	100		Всего	65473,1	100

Удельный расход условного топлива  $b = 42,9$  кг у.т./т, КПД = 63,6 %, КИТ = 77,46 %

## ВЫВОДЫ

1. Специалистами РУП «БМЗ» и БГПА продолжены комплексные исследования тепловой работы нагревательных печей станов 850 и 320, направленные на усовершенствование теплотехнологических режимов и увеличение производительности действующего оборудования при производстве кордовых марок сталей нового типа (80К–90К).

2. Проведены промышленные экспериментальные исследования нагрева непрерывнолитых заготовок (сталь 80К). На основании анализа тепловой работы печей выявлены резервы для дальнейшего усовершенствования тепловой обработки высокоуглеродистых марок сталей с целью повышения производительности газопламенных печных установок и снижения удельного расхода условного топлива.

3. С использованием результатов промышленных экспериментов и математической модели сопряженного теплообмена разработан программный продукт, на основе которого выполнены серии компьютерных экспериментов с целью разработки наиболее эффективных для конкретных условий теплотехнологий при нагреве специальных высокоуглеродистых марок сталей. Результаты исследований апробированы в условиях действующего производства (для печи стана 320), при этом удельный расход условного топлива находится на уровне 38–45 кг у. т./т (в зависимости от производительности), что соответствует лучшему мировому уровню печных установок с механизированным подом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И., Филиппов В. В., Трусова И. А. Разработки Белорусской государственной политехнической академии для Белорусского металлургического завода и металлургических предприятий стран СНГ // *Литье и металлургия*. – 2000. – № 3.
2. Разработка рациональной теплотехнологии нагрева кордовой стали в проходной печи стана 850 РУП «БМЗ» / В. В. Филиппов, В. И. Тимошпольский, В. А. Тищенко и др. // *Энергетика...* (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2.
3. Завелион В. И., Вайс Р. Б., Трусова И. А., Духвалов И. Л. Математическое моделирование нагрева заготовок с шагающими балками (сопряженная постановка) // *Энергетика...* (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 1–2.
4. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. – Мн.: Наука і тэхніка, 1995.
5. Математическое моделирование и усовершенствование тепловой работы многозонной методической печи / Э. О. Цкитишвили, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова и др. // *Энергетика...* (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 2.

Представлена техническим советом  
РУП «Белорусский металлургический завод»

Поступила 5.10.2001

УДК 666.954.3.004.183

### **К ВОПРОСУ РАЦИОНАЛЬНОГО ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Кандидаты техн. наук, доценты РОМАНЮК В. Н., СУДИЛОВСКИЙ В. К.,  
магистры техн. наук ТОМКУНАС Е. В., БАУК И. В.**

*Белорусская государственная политехническая академия*

Современное промышленное производство характеризуется радикальной трансформацией отношения к использованию энергоресурсов. В странах СНГ этот процесс активизировался с переменой их статуса и последующим в связи с этим изменением обеспеченности первичными энергоресурсами. Одной из черт нового положения энергетики вообще и промышленной энергетики в частности стало регулярное обязательное энергетическое обследование промышленных предприятий. За прошедший период получены определенные результаты, в основном на пути реализации малозатратных мероприятий, которые касались, как правило, наведения элементарного порядка в использовании энергии. Возможности такого пути постепенно исчерпываются и при этом требуется повышение эффективности энергосберегающих мероприятий.

В [1–3] при рассмотрении предприятий дорожной отрасли отмечается, что ситуация с крайне нерациональным использованием первичной энергии предопределена всем процессом становления теплотехнологических производств. Общей отличительной особенностью развития теплотехнологических систем преобразования вещества, а они изначально доминируют