



The methods of the industrial experiments carrying out at heating of metal in furnaces of modern construction at the example of furnaces of rolling production of RUP «BMZ» are worked out.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, БНТУ

УДК 621.783

ТЕПЛОВАЯ РАБОТА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ. СООБЩЕНИЕ 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ НАГРЕВЕ ЗАГОТОВОК В ПЕЧАХ С МЕХАНИЗИРОВАННЫМ ПОДОМ

Введение. В последние десятилетия на металлургических предприятиях для нагрева заготовок широкое распространение получили печи с механизированным подом (с шагающим подом, с шагающими балками и комбинированные), что обусловлено их преимуществами по сравнению с печами других типов (толкательные, кольцевые, ролевые) [1, 2]: уменьшение времени нагрева заготовок примерно в 2 раза; снижение окисления и обезуглероживания поверхности металла при нагреве; отсутствие поверхностных дефектов в результате трения заготовок о подину и устранение свариваемости заготовок за счет наличия зазоров; легкость удаления заготовок из всей печи или высокотемпературной ее зоны при остановках стана, в конце смены, перед ремонтом и т. д.; возможность легкого разделения отдельных плавок металла или мелких партий заготовок, требующих различных режимов нагрева; отсутствие зависимостей между выдачей и загрузкой заготовок, позволяющее включить печи в поток с агрегатами, работающими с различным ритмом; высокая степень механизации и автоматизации, четкая поштучная выдача заготовок.

В составе оборудования прокатных станов РУП «Белорусский металлургический завод» 850, 320 (ранее стан 320/150), 150 функционируют три нагревательные печи современной конструкции с шагающими балками и механизированным комбинированным подом, предназначенные для нагрева заготовок сечением 125×125 и 140×140 мм (печи станов 320 и 150), 250×300 и 300×400 мм (печь стана 850).

Нагревательная печь с комбинированным подом стана 320 введена в эксплуатацию в 1984 г.

На момент ввода печь представляла собой уникальный агрегат, под которого составляли два подвижных участка: участок шагающих балок и участок шагающего пода. Печь оборудована рекуперативным теплообменником для подогрева воздуха до температуры 450 °С. В методической зоне печи ниже уровня шагающих балок установлены шесть длиннофакельных боковых горелок типа FP, а в высокотемпературных зонах – 96 сводовых плоскопламенных горелок типа ВFM. Схема печи показана на рис. 1, расположения горелочных устройств – на рис. 2.

Нагревательная печь стана 850 эксплуатируется с 1987 г. Большой сортамент металлопродукции, выпускаемой на стане, возможность нагрева заготовок различного сечения (250×300 и 300×400 мм), организация нагрева металла с холодного и горячего посада обуславливают широкий спектр температурных режимов, реализуемых при нагреве

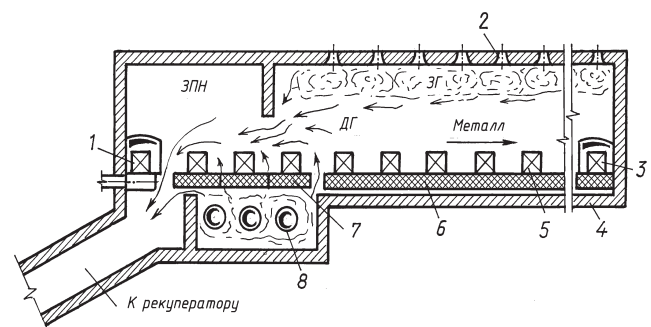


Рис. 1. Схема нагревательной печи стана 320/150: 1 – боковой посад заготовок; 2 – сводовая плоскопламенная горелка; 3 – боковая выдача заготовок; 4 – обмуровка печи; 5 – нагреваемая заготовка; 6 – участок шагающего пода; 7 – шагающие балки; 8 – боковая длиннофакельная горелка; ЗПН – зона предварительного нагрева; ЗГ – зона горения; ДГ – дымовые газы

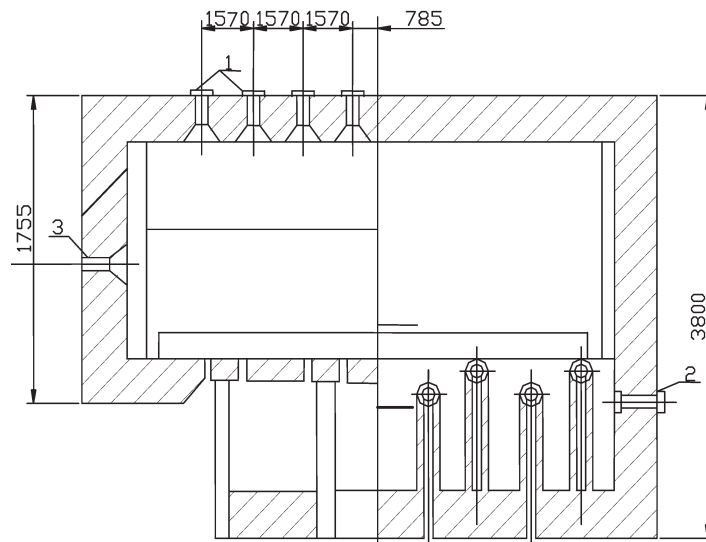


Рис. 2. Схема расположения горелочных устройств в печи стана 320/150: 1 – сводовые горелки; 2 – боковые горелки; 3 – смотровые окна

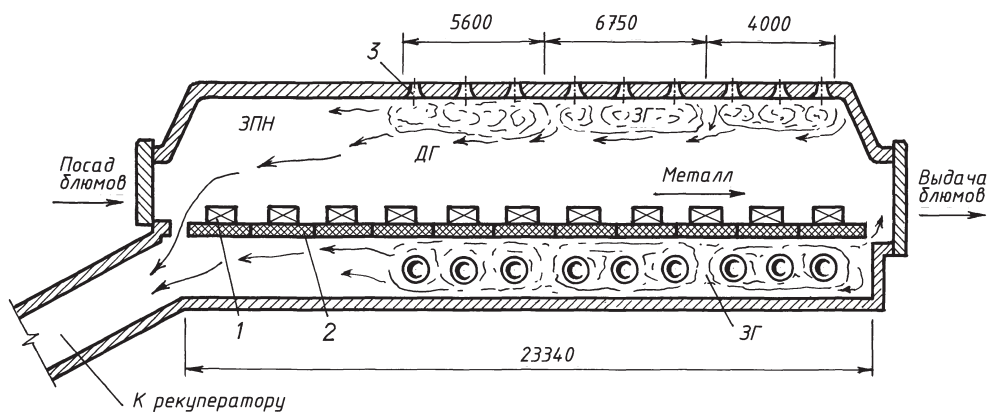


Рис. 3. Схема нагревательной печи стана 850 РУП «БМЗ»: 1 – заготовка; 2 – шагающие балки; ЗПН – зона предварительного нагрева; ДГ – дымовые газы

в данной печи. Печь имеет двустороннее отопление: в нижних зонах с помощью 18 боковых длинофакельных горелок типа «HRT» Bloom-1200, а в верхних – 27 плоскопламенных горелок типа «HRT» Bloom-2110. Схема нагревательной печи показана на рис. 3.

Экспериментальные исследования тепловой работы печи стана 320/150 (320). Первые промышленные экспериментальные исследования нагрева металла были выполнены при освоении проектной мощности печи стана 320/150 в 1985 г.

Основными целями исследований являлись установление фактической динамики нагрева непрерывнолитых заготовок при освоении первой очереди Белорусского металлургического завода; устранение недостатков в работе печи, сопровождающих пусковой период оборудования; разработка научно обоснованных норм удельного расхода топлива.

Методика термометрирования заготовок при нагреве в печи приведена в работе [3]. Результаты измерения температур в металле представлены на

Таблица 1. Тепловой баланс печи при нагреве заготовки из стали Ст. 3 размером 0,125×0,125 м

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	14,04	77,61	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	7,48	38,18
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	0,14	15,13	2. Потери теплоты с уходящими газами	5,63	28,73
3. Теплота экзотермических реакций	1,31	7,28	3. Потери теплоты теплопроводностью через кладку	2,60	13,27
4. Физическая теплота металла			4. Потери теплоты излучением	0,14	0,72
			5. Потери теплоты с окалиной	0,40	2,05
			6. Потери теплоты с охлаждающей водой	2,57	13,12
			7. Неучтенные потери	0,63	3,96
Всего	18,19	100,0	Всего	18,19	100,0

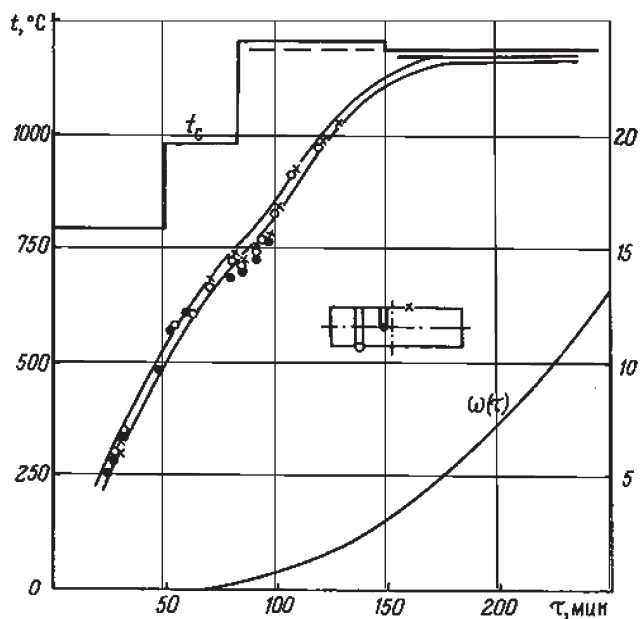


Рис. 4. Изменение температур и динамика окисления при нагреве заготовок из стали Ст. 3 сечением 0,125×0,125 м в печи стана 320/150

рис. 4, тепловой баланс работы печи в процессе эксперимента – в табл. 1.

Удельный расход условного топлива в соответствии с опытными данными составил 49 кг у.т./т.

Полученные результаты использованы при освоении режимов нагрева рядовых и низколегированных марок стали, при этом была показана возможность достижения производительности печи стана 320/150 на уровне 190–200 т/ч при проектной 170 т/ч, значения удельного расхода условного топлива – 35–37 кг у.т./т.

В дальнейшем были выполнены экспериментальные исследования режимов нагрева высокоуглеродистых сталей (70К). При этом, учитывая результаты первых (пусковых) экспериментальных исследований режимов нагрева, которые доказывают практически полную симметрию нагрева непрерывнолитой заготовки сечением 0,125×0,125 м относительно центральной плоскости, при последующих термометрированиях заготовок ограничивались измерением температур в двух характерных точках поперечного сечения – вблизи центральной оси и посередине верхней грани [4]. Кроме того, для исследования процессов окисления и обезуглероживания поверхностных слоев использовали специальные образцы размером исследуемой заготовки 0,125×0,125 м и толщиной ~20 мм. На рис. 5 приведены результаты измерений при нагреве заготовки размерами 0,125×0,125×12 м из кордовой стали.

При освоении в 1990–1994 гг. на РУП «БМЗ» комплексной (сквозной) технологии производства стали 50ХГФА для получения мало- и многоли-

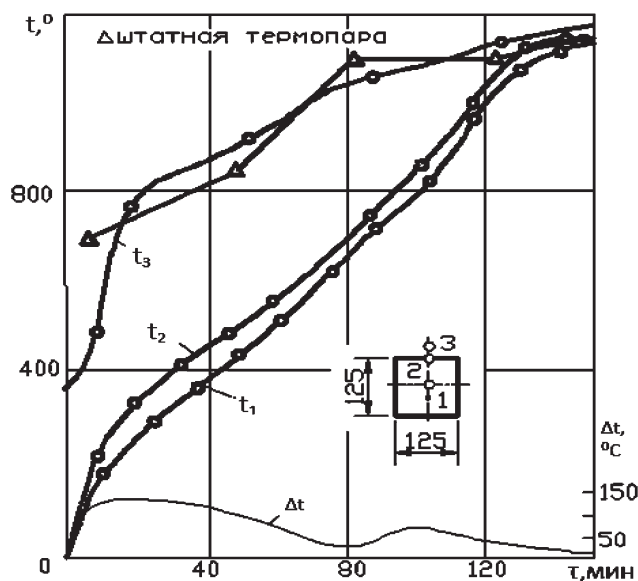


Рис. 5. Изменение температур при нагреве заготовок из стали 70К сечением 125×125 мм в печи стана 320/150

стовых рессор и высокоуглеродистых марок сталей для получения специальных видов проволоки [2, 5] выполнены экспериментальные исследования режимов нагрева заготовок сечением 125×125 мм из стали марок 50ХГФА и Ст. 75. При выполнении экспериментальной части исследований учитывали повышенные требования к качеству указанных специальных марок сталей и в конкретном случае методика исследований режимов нагрева была усовершенствована. Впервые для условий РУП «БМЗ» и печи стана 320/150 при термометрировании заготовки сечением 0,125×0,125 м из высокоуглеродистых марок сталей (С – 0,75–0,80, 0,85–0,90%) рабочие спай термомпар расположили (зачеканили) в пяти точках: грань (середина) и ребро верхней поверхности, центр, середина грани нижней поверхности, температура в районе верхней поверхности заготовки (рис. 6). Очевидно, что нагрев заготовки происходит практически с постоянной скоростью до температуры 750–770 °С, т. е. при постоянной тепловой мощности печи. Температурный перепад между поверхностью и центром достигает максимума в интервале температур 750–900 °С, что соответствует температуре фазовых превращений в стали и о чем свидетельствует характер изменения температуры центральной плоскости (наличие площадки).

Конечный температурный перепад находится на уровне 30–40 °С. Из рисунка видно, что имеет место практически симметричный нагрев верхней и нижней поверхностей, что подтверждает ранее сделанные выводы.

Результаты исследований технологии нагрева заготовки сечением 0,125×0,125 м из стали 50ХГФА приведены на рис. 7. Здесь очевиден быстрый

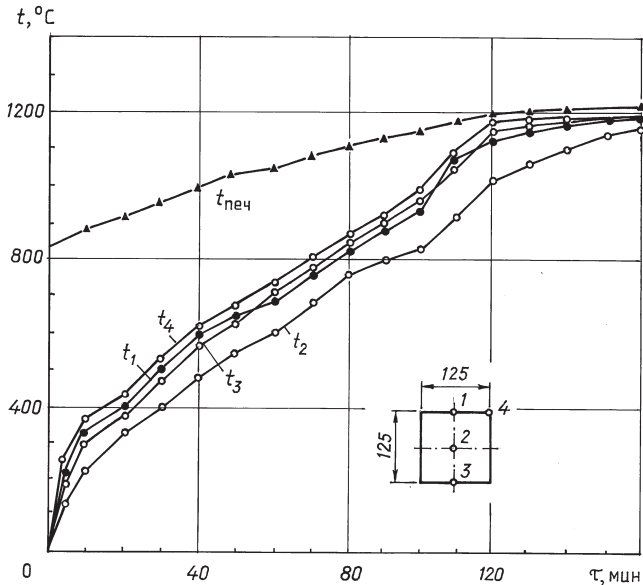


Рис. 6. Изменение температур при нагреве заготовок из высокоуглеродистой стали (Ст. 75) сечением 125×125 мм в печи стана 320/150

рост температуры поверхностных слоев до уровня 900–1000 °С, в области центральной части заготовки наблюдается площадка температур в районе фазовых превращений. Количество окалины, по данным промышленных экспериментов, составило 1,7%, толщина обезуглероженного слоя – 1,5 мм.

В течение 2003–2005 гг. была выполнена реконструкция печи стана 320, включающая замену газогорелочных устройств. Основанием для реконструкции послужили результаты комплексных экспериментально-теоретических исследований, проведенных под руководством В. И. Тимошпольского. В процессе исследований до начала ремонтных работ на печи стана 320 были проведены два эксперимента при различной тепловой мощности печи. Во время экспериментальных работ фиксировались все основные показатели тепловой работы нагревательной печи (производительность, температура печного пространства по зонам, расход газа и воздуха, количество и температура охлаждающей воды, температура уходящих газов и др.),

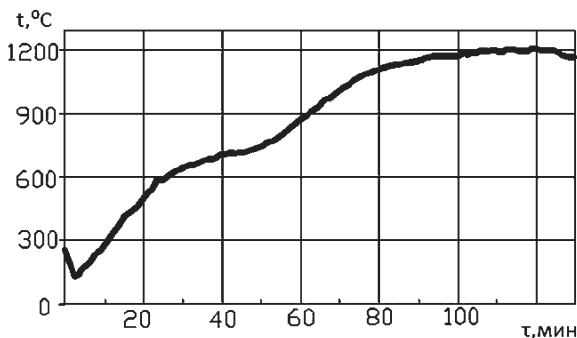


Рис. 8. Изменение температуры центра заготовки сечением 125×125 мм из стали Ст. 3 при нагреве в печи стана 320 (эксперимент I)

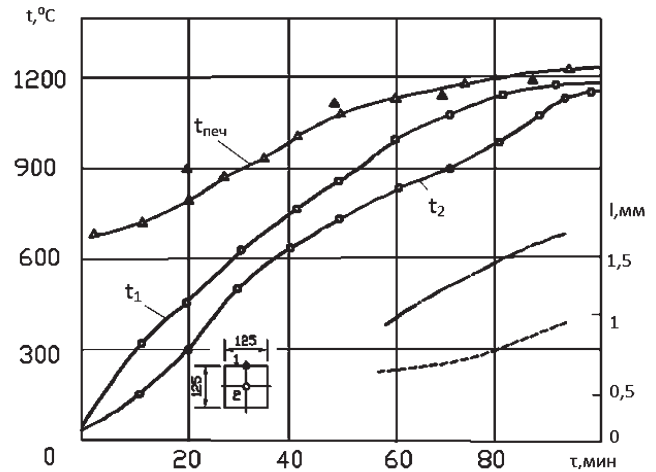


Рис. 7. Изменение температур при нагреве заготовки из стали 50ХГФА сечением 125×125 мм в печи стана 320/150: —●— толщина обезуглероженного слоя; - - - толщина слоя окалины; ▲ – показания штатных термопар

что позволило, в конечном итоге, определить фактические теплотехнические параметры печи в период проведения экспериментальных исследований.

При проведении экспериментов измерялась температура в центре заготовки, как в наиболее характерной точке сечения [6]. Именно по этим значениям можно реально оценить, насколько прогрета заготовка в момент выхода из печи. Размеры нагреваемых заготовок – 125×125 мм; марка стали – Ст. 3; шаг раскладки заготовок на поду печи – 200 мм.

На рис. 8 (эксперимент I) и рис. 9 (эксперимент II) представлена динамика изменения температуры в указанной точке сечения заготовки. И в первом (рис. 8), и во втором (рис. 9) случаях наблюдается плавное повышение температуры центра заготовки в методической зоне примерно до 750 °С. При этом скорость повышения температуры в исследуемой точке в методической зоне составляет 18–22 град/мин (для эксперимента I) и 25–30 град/мин (для эксперимента II). При попадании заготовки в сварочную зону наблюдается быстрый подъем температуры, но скорость нагрева не превышает ранее приведенных показателей. Требуемого зна-

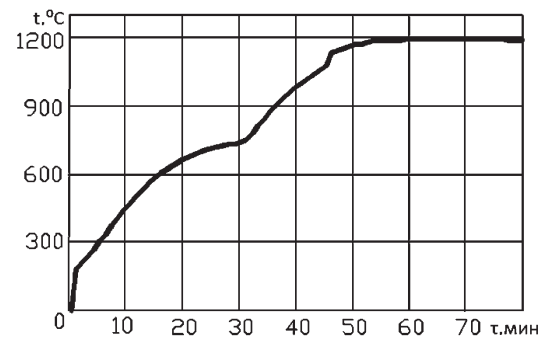


Рис. 9. Изменение температуры центра заготовки сечением 125×125 мм из стали Ст. 3 при нагреве в печи стана 320 (эксперимент II)

чения (1190–1200 °С) температура заготовки достигает уже в начале томильной зоны.

О температурном перепаде по сечению заготовки, исходя из экспериментальных данных, судить нет возможности, так как температура фиксировалась лишь в одной точке. Но небольшие размеры и значения температуры центра заготовки позволяют предположить, что уже в начале томильной зоны температурный перепад практически равен нескольким градусам. А это значит, что есть возможность сократить время нагрева и, тем самым, повысить производительность печи без ущерба качеству нагрева.

С целью анализа теплотехнических характеристик нагревательной печи стана 320 были проведены расчеты фактических тепловых балансов. Удельный расход условного топлива по данным эксперимента I составил 58,7 кг у.т./т, а в эксперименте II – 53 кг у.т./т. Очевидно, что сокращение времени нагрева на 40 мин (разница между первым и вторым экспериментом) позволяет сэкономить 5,7 кг у.т./т и КПД печи при этом возрастает с 43,75 до 48,33%. Вместе с тем, данные цифры показали неудовлетворительную тепловую работу печи и горелочных устройств. Отмечаются высокие потери через ограждающие конструкции, что приводит к низкому КПД.

Согласно данным, приведенным ранее, при исследовании тепловой работы нагревательной печи стана 320 в период 1985–1986 гг. удельный расход условного топлива составлял 37–40 кг у.т./т, а производительность достигала 170 т/ч. Сравнение результатов расчета фактических тепловых балансов и показателей исследуемой печи в начальный период работы показывает, что потери через ограждающие конструкции возросли в 3,0–3,5 раза. Ви-

зуальные наблюдения за работой газогорелочных устройств подтвердили, что ухудшение работы печи обусловлено не только износом футеровки, но выгоранием и разрушением горелочных камней. Это привело к тому, что в высокотемпературных зонах при нормальном режиме работы факел у некоторых плоскопламенных горелок отрывается от свода, имеет нестабильную форму и цвет, т. е. горелочное устройство не обеспечивает требуемые условия сжигания топлива и, тем самым, ухудшает теплообмен в рабочем пространстве печи.

После реконструкции печи в 2005 г. были проведены дополнительные экспериментальные исследования, целью которых являлась настройка нового оборудования и корректировка температурных режимов нагрева заготовок с учетом изменений условий теплообмена.

В процессе проведения экспериментальных исследований нагрев заготовок из стали Ст. 3 сечением 125×125 мм осуществляли по режиму холодного посада. Температура поверхности заготовок при посадке в нагревательную печь составляла 100–200 °С. В заранее просверленные отверстия были зачеканены шесть хромель-алюмелевых термопар. Жгут термопар жестко закрепили на арматуре, приваренной к заготовке. Для обеспечения укладки жгута во время проведения эксперимента изготовили специальную конструкцию, представляющую собой швеллер длиной 2 м, закрепленный на шарнирной опоре. Выводы термопар присоединили к потенциометру и произвели загрузку заготовки в печь. Измеряли температуру в следующих точках сечения заготовки: 1 – середина верхней грани; 2 – угол верхней грани; 3 – центр заготовки, 4 – середина верхней грани; 5 – середина нижней грани; 6 – угол нижней грани.

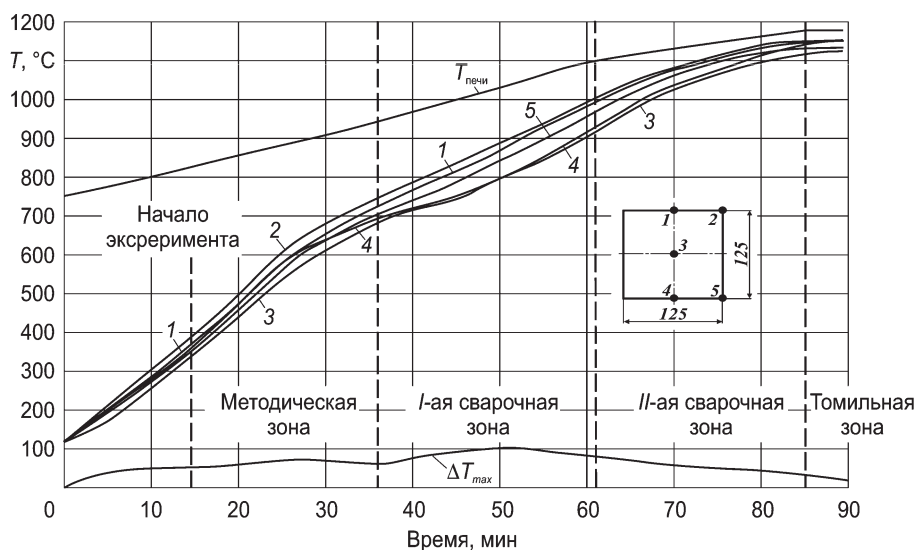


Рис. 10. Динамика изменения температур в различных точках сечения заготовки сечением 125×125 мм из стали Ст. 3 при нагреве в печи стана 320

Анализируя результаты, приведенные на рис. 10, можно отметить следующее.

- Наибольшая скорость нагрева 17,7–20,0 град/мин наблюдается в методической зоне. При этом температурный перепад по сечению заготовки достигает 73 °С, а к моменту попадания заготовки в сварочную зону несколько снижается. В первой сварочной зоне скорость нагрева поверхностных слоев заготовки практически постоянна и составляет ~10 град/мин. В дальнейшем она постепенно уменьшается и в томильной зоне температура поверхности заготовки не изменяется (кривые 1, 2, 5, 6). Максимального значения 106 °С температурный перепад по сечению заготовки достигает в I сварочной зоне. В целом температурные кривые контрольных точек сечения заготовки имеют плавный характер и к моменту выдачи заготовка прогревается до требуемого состояния.

- Помимо сказанного, полученные данные позволяют оценить степень асимметричности нагрева заготовки, т. е. различие температур верхней и нижней грани. Как видим, на протяжении всего времени проведения эксперимента температуры в точках 5 и 6 (середина и угол нижней грани) оставались ниже соответствующих значений температур в точках 1 и 2, расположенных на верхней грани. Данный факт свидетельствует о том, что, несмотря на предварительный подогрев заготовок снизу в методической зоне, несимметричность нагрева не устраняется.

- Уже в начале томильной зоны заготовка достигает температуры прокатки, а температурный перепад по сечению заготовки не превышает 10–15 °С. Фактически выравнивание температурного поля происходит во II сварочной зоне, а томильная зона работает вхолостую.

Расчет теплового баланса по результатам эксперимента показал, что удельный расход условного топлива с учетом того, что начальная температура заготовки находилась на уровне 130–150 °С,

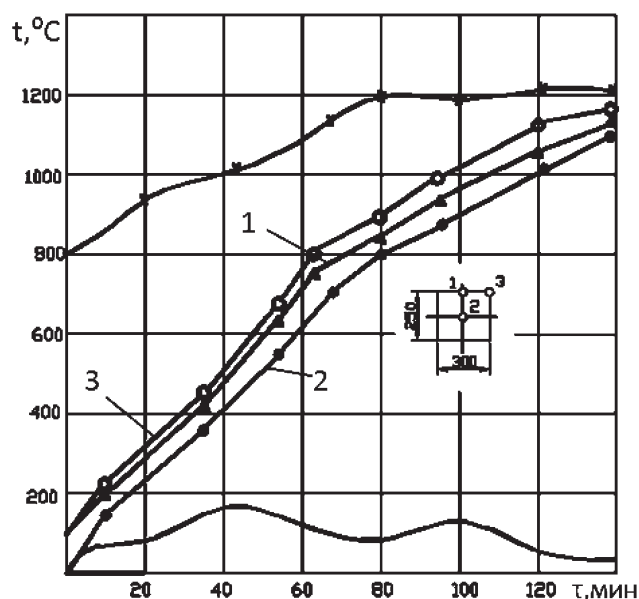


Рис. 11. Динамика нагрева заготовки размером 250×300 мм из стали 70К (производительность 45 т/ч)

составил 40,85 кг у.т./т (табл. 2) при производительности печи 110 т/ч.

Экспериментальные исследования тепловой работы стана 850. Первые опыты по измерению температур при нагреве металла в печи стана 850 проводили на заготовке трубной стали 45 размерами 250×300×5000 мм [1], но, вместе с тем, представляют интерес результаты экспериментальных исследований наукоемких марок стали. В связи с этим приведем некоторые результаты термометрирования заготовок на примере стали марок 70К, 80К, 40Х, ШХ15СГ, выполненные на протяжении 1990–2006 гг.

На рис. 11, 12 приведены результаты термометрирования заготовок сечением 0,25×0,30 м из стали 70К при нагреве их в печи стана 850 с холодного посада.

Общим для двух приведенных графиков является то, что динамика нагрева заготовок имеет два ярко выраженных максимума температурных пе-

Таблица 2. Тепловой баланс нагревательной печи стана 320 (эксперимент)

Приход теплоты			Расход теплоты		
	МВт	%		МВт	%
1. Химическая теплота топлива	36,60	84,64	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	22,90	52,95
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	5,26	12,71	2. Потери теплоты с уходящими газами	11,93	27,59
3. Теплота экзотермических реакций	1,38	3,19	3. Потери теплоты от химического недожога	0,14	0,31
			4. Потери теплоты теплопроводностью через кладку	3,09	7,15
			5. Потери теплоты с охлаждающей водой	3,89	8,98
			6. Потери теплоты с окалиной	0,34	0,79
			7. Потери теплоты излучением	0,01	0,01
			8. Неучтенные потери	0,95	2,21
Всего	43,44	100,0	Всего	43,24	100,0

Расход топлива – 3829,89 м³/ч, производительность печи – 109,95 т/ч, удельный расход условного топлива – 40,85 кг у.т./т, КПД – 0,61.

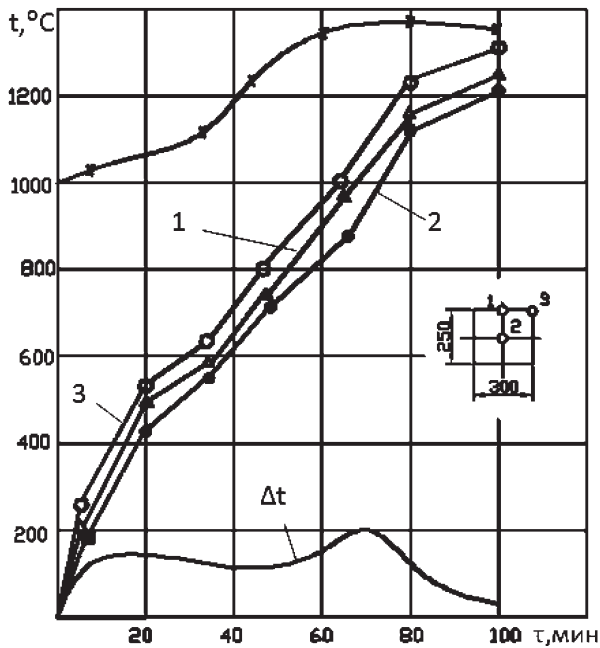


Рис. 12. Динамика нагрева заготовки размером 250×300 мм из стали 70К (производительность 70 т/ч)

репадов по сечению заготовки. При этом первый максимум связан с переходом металла из упруго-пластического состояния в пластическое, а второй – с фазовыми переходами стали. Необходимо отметить и такие отрицательные моменты в ходе нагрева, как довольно существенная величина температурного перепада к концу нагрева, а также перегрев уголка заготовки.

В дальнейшем в связи с освоением марок стали с повышенным содержанием углерода были выполнены экспериментальные исследования нагрева стали марки 80К (рис. 13) [7], по результатам термометрирования составлен тепловой баланс нагревательной печи стана 850 (табл. 3).

Учитывая, что в зависимости от марки стали и производительности прокатного стана заготовки сечением 250×300 и 300×400 мм могут нагреваться как с холодного, так и с горячего посада, приведем результаты экспериментов для горячего посада применительно к легированным маркам стали.

Принимая во внимание результаты ранее выполненных промышленных экспериментов, мето-

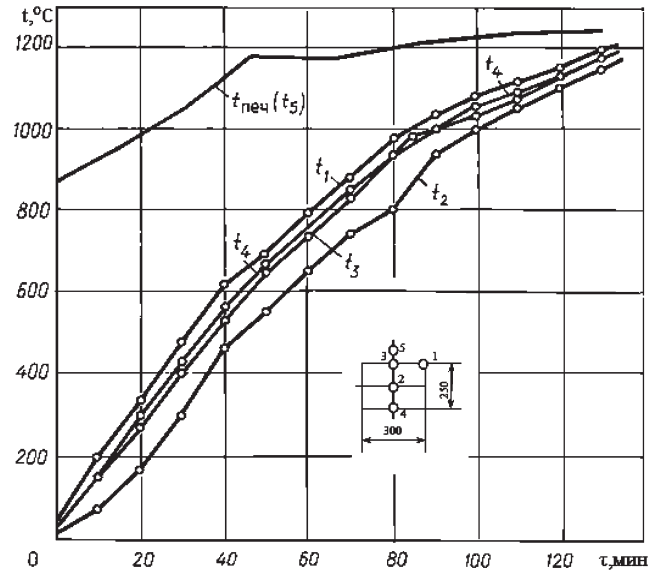


Рис. 13. Изменение температуры в характерных точках сечения при нагреве заготовки размером 250×300 мм из стали 80К

дика исследований была усовершенствована. С целью снижения вероятности обрыва жгута термопар и получения достоверных результатов в процессе проведения эксперимента термопары опускались в печь через технологическое отверстие, специально проделанное в своде печи в начале методической зоны. Затем жгут термопар с помощью шестиметрового крюка вытягивали через окно посада. После охлаждения термопары зачеканивали в отверстия, просверленные в опытной заготовке. Данную операцию осуществляли непосредственно на столе посада перед печью. Затем заготовка была посажена в печь. На расстоянии одного шага подвижных балок (300 мм) до момента выдачи заготовки из печи измерительный прибор был отсоединен от жгута термопар, который затем с помощью крюка был удален из печи. В результате проведения данного эксперимента было установлено, что на протяжении всего процесса нагрева, несмотря на двустороннее отопление, наблюдается значительная разница температур между верхней и нижней гранью заготовки, превышающая в сварочной зоне 150 °С. В начале томильной зоны она снижается до 85 °С. Данный факт свидетельствует

Т а б л и ц а 3. Тепловой баланс нагревательной печи стана 850 (эксперимент)

Приход теплоты			Расход теплоты		
	МВт	%		МВт	%
1. Химическая теплота топлива	27,79	82,61	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	15,81	47,61
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	4,66	13,86	2. Потери теплоты с уходящими газами	12,26	36,92
3. Теплота экзотермических реакций	1,19	3,54	3. Потери теплоты теплопроводностью через кладку	2,32	7,0
			4. Потери теплоты излучением	0,6	1,81
			5. Потери теплоты с окалиной	0,35	1,06
			6. Потери теплоты с охлаждающей водой	1,35	4,07
			7. Неучтенные потери	0,53	1,6
Всего	33,64	100,0	Всего	33,21	100,0

Расход топлива – 2885 м³/ч, производительность печи – 69 т/ч, удельный расход условного топлива – 49,5 кг у.т./т, КПД – 0,57.

о том, что существующие температурные режимы нагрева требуют корректировки с целью повышения симметричности нагрева заготовок.

Как было отмечено выше, нагрев заготовок в печи стана 850 РУП «БМЗ» может проводиться с горячего посада, при этом количество металла с высоким теплосодержанием (температура в начале нагрева > 550 °С) составляет более 60%. Очевидно, что организация горячего посада металла позволяет сокращать время нагрева, приводит к экономии топлива и т. д. Но, вместе с тем, это требует знания температурного перепада по сечению заготовки и динамики изменения температур в характерных точках сечения от момента посада заготовки в печь до момента ее выдачи. Для решения данной задачи специалистами БНТУ и РУП «БМЗ» разработана специальная методика проведения эксперимента.

В соответствии с указанной методикой были проведены исследования по термометрированию непрерывнолитых заготовок из стали марок 40X и ШХ15СГ [6].

Работы проводили в следующем порядке.

1. В методической зоне печи предварительно было проделано технологическое отверстие в своде диаметром 28 мм напротив смотрового окна в боковой стене.

2. Заготовку размером 250×300×5300 мм из стали ШХ15СГ (40X) загрузили в нагревательную печь и выдерживали в методической зоне в течение получаса при температуре 1020 °С. Все это время в связи с перевалкой печь работала вхолостую.

3. Затем опытную заготовку подавали под технологическое отверстие в своде печи, через которое опускали термопары. С помощью крючков через смотровое окно их вставляли в заранее просверленные отверстия, а свободные концы подсоединяли к клеммам разъемам вторичного прибора. В качестве вторичного прибора использовали потенциометр HoneyWell VRX-100.

4. Когда среднемаховая температура заготовки достигала значения, удовлетворяющего требованиям действующей технологической инструкции при организации горячего посада (не менее 550 °С), ее перемещали к началу методической зоны и начинали загрузку остальных заготовок плавки.

5. Температурный режим нагрева по зонам печи был установлен в соответствии с требованиями технологической инструкции. Значения температур, полученные на основании показаний штатных термопар, расходы газа и воздуха по зонам печи, приведены ниже.

Номер зоны	Температура, °С	Расход газа, м ³ /ч	Расход воздуха, м ³ /ч
1	1160	640	6400
2	1215	150	1500
3	1208	300	3800
4	1227	900	9000
5	1235	50	500
6	1240	120	1200
7	1208	130	1250

6. Когда заготовка переместилась к окну выдачи, термопары были отсоединены от потенциометра. При выдаче металла термопары извлекали из заготовки и с помощью крючков вытащили из печи. Исследуемая заготовка по рольгангу была отправлена на аварийный стол, где с нее были взяты пробы окалины.

В ходе эксперимента применяли хромель-алюмелевые термопары диаметром 0,5 мм. Каждую термопару изолировали защитной металлической оболочкой, предохраняющей термопару от механических повреждений и агрессивного воздействия печной среды.

С целью определения технико-экономических показателей печи дополнительно фиксировали следующие параметры: количество нагреваемых заготовок и время нагрева, объем и температуру охлаждающей воды на входе и выходе из системы, температуру уходящих газов до и после рекуператора, температуру подогрева воздуха и др.

Результаты измерений приведены на рис. 14, 15.

Анализируя данные по нагреву заготовки из шарикоподшипниковой стали ШХ15СГ (рис. 14), необходимо отметить, что в начале нагрева температуры в характерных точках сечения заготовки были следующие: угол – 856 °С, центр – 716 °С. В процессе нагрева температурный перепад вначале возрос до 230 °С (I сварочная зона), а к началу томильной зоны уменьшился до 30 °С. Максимальная скорость нагрева для поверхности наблюдалась в начале сварочной зоны и составила 7,4 град/мин, а для центра в конце сварочной зоны – 13 град/мин. К середине томильной зоны значение температурного перепада между исследуемыми точками составляло 5 °С. Это свидетельствует о том, что есть возможности сократить время нагрева и, тем самым, повысить производительность печи без ущерба качеству нагрева.

На рис. 15 приведены результаты термометрирования непрерывнолитой заготовки из стали 40X. Методика проведения эксперимента аналогична предыдущему. К моменту, когда в теле заготовки были закреплены термопары, температура поверхности составляла ~800 °С, а центр прогрелся до 540 °С. После этого начался посад остальных за-

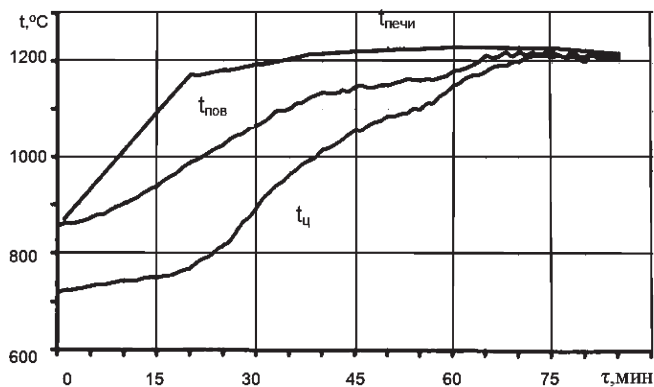


Рис. 14. Результаты экспериментального исследования нагрева заготовки сечением 250×300 мм из стали ШХ15СГ с горячего посада в печи стана 850

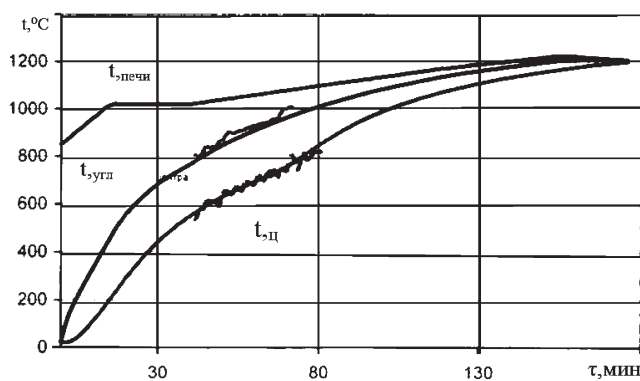


Рис. 15. Результаты экспериментального исследования нагрева заготовки сечением 250×300 мм из стали 40X с горячего посада в печи стана 850

Таблица 5. Результаты расчета теплового баланса для печи стана 850 РУП «БМЗ» при нагреве заготовок из стали ШХ15СГ размером 250×300 мм (горячий посад)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	18,223	78,27	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	9,12	39,18
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	3,523	15,14	2. Потери теплоты с уходящими газами	7,48	32,13
3. Теплота экзотермических реакций	1,536	6,60	3. Потери теплоты теплопроводностью через кладку	1,32	5,67
			4. Потери теплоты излучением	0,16	0,7
			5. Потери теплоты с окалиной	0,35	1,51
			6. Потери теплоты с охлаждающей водой	2,98	12,80
			7. Неучтенные потери	1,872	8,04
Всего	23,282	100,0	Всего	23,282	100,0

Расход топлива – 1961 м³/ч, производительность печи – 97,87 т/ч, удельный расход условного топлива – 22,85 кг у.т./т, КПД – 0,5.

Таблица 6. Результаты расчета теплового баланса для печи стана 850 РУП «БМЗ» при нагреве заготовок из стали 40X размером 250×300 мм (горячий посад)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	15,207	77,61	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	7,48	38,18
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	2,964	15,13	2. Потери теплоты с уходящими газами	5,63	28,73
3. Теплота экзотермических реакций	1,425	7,28	3. Потери теплоты теплопроводностью через кладку	2,60	13,27
			4. Потери теплоты излучением	0,14	0,72
			5. Потери теплоты с окалиной	0,40	2,05
			6. Потери теплоты с охлаждающей водой	2,57	13,12
			7. Неучтенные потери	0,776	3,96
Всего	19,596	100,0	Всего	19,596	100,0

Расход топлива – 1637 м³/ч, производительность печи – 60,5 т/ч, удельный расход условного топлива – 30,84 кг у.т./т, КПД – 0,38.

готовок плавки. Снятие показаний температуры ребра заготовки производили в течение 35 мин, центра – 40 мин, после чего жгут оборвался. С целью изучения процесса нагрева в полном объеме были дополнительно проведены расчетные исследования, что позволило дополнить результаты экспериментальных исследований.

С целью определения технико-экономических показателей нагревательной печи стана 850 на основании экспериментальных данных были рассчитаны тепловые балансы (табл. 5, 6).

Выводы

1. Разработана методика проведения промышленных экспериментов при нагреве металла в печах современной конструкции (с шагающим подом и шагающими балками) на примере печей прокатного производства РУП «Белорусский металлургический завод».

2. Приведены результаты экспериментальных исследований заготовок различного сечения (0,125×0,125, 250×300 мм) для наукоемких марок стали при нагреве в печах станов 320/150, 320, 850

РУП «БМЗ» с холодного и горячего посада, направленные на усовершенствование режимов тепловой обработки и при освоении нового марочного состава, проанализированы теплотехнические и технико-экономические показатели оборудования.

Литература

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
2. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. А. Трусова, В. В. Филиппов, А. П. Несенчук; Под общ. ред. В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
3. Тимошпольский В. И., Трусова И. А. Тепловая работа нагревательных печей прокатного производства в промышленных условиях. Сообщение 1. Методические печи толкательного типа // Литье и металлургия. 2010. № 1–2. С. 214–219.
4. Исследование технологии нагрева непрерывнолитых заготовок высокоуглеродистых сталей в печах с шагающими балками / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, П. П. Петух и др. // Сталь. 1995. № 4. С. 34–38.
5. Разработка технологических режимов при производстве полосового проката из стали 50ХГФА в условиях Белорусского металлургического завода / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Н. Л. Мандель и др. // Науч.-техн. сб.: Совершенствование технологических процессов на Белорусском металлургическом заводе. Жлобин, 1994. С. 98–101.
6. Новые экспериментальные исследования процессов нагрева металла в печах с механизированным подом РУП «Белорусский металлургический завод» / В. И. Тимошпольский, В. А. Тищенко, И. А. Трусова и др. // Литье и металлургия. 2002. № 4. С. 148–153.
7. Разработка рациональной теплотехнологии нагрева кордовой стали в проходной печи стана 850 РУП «БМЗ» / В. В. Филиппов, В. И. Тимошпольский, В. А. Тищенко и др. // Изв. вузов и энергет. объедин. СНГ. Энергетика. 2001. № 2. С. 80–86.