

23. Водовоздушное охлаждение блюмовых заготовок на МНЛЗ Оскольского электрометаллургического комбината / Ю.М. Айзин, В.И. Ганин, А.М. Ереметов и др. // Сталь. 1989. № 9. С. 28 – 30.

24. Усовершенствование конструкции коллектора в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / К.Н. Вдовин, А.Д. Носов, С.В. Горосткин и др. // Сталь. 1999. № 11. С. 24 – 25.

25. Комплексные исследования процессов формирования непрерывнолитых стальных заготовок с целью повышения качества / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, Н.В. Андрианов и др. // Литье и металлургия. 2004. № 1. С. 5 – 11.

26. Корзунин Л.Г., Буланов Л.В. Зависимость усилий правки непрерывнолитой заготовки от конструктивных и технологических факторов // Сталь. 1999. № 9. С. 22 – 24.

27. Улучшение качества и повышение экономичности технологии непрерывного литья заготовок / П. Мюллер, Г. Грундман, Х. фон Выл и др. // Черные металлы. 2003. № 2. С. 44 – 48.

28. Автоматическое регулирование конусности и толщины непрерывнолитого слитка в ходе процесса непрерывной разливки / К. Федершпиль, К. Мервальд, М. Талхаммер и др. // Черные металлы. 2001. № 6. С. 64 – 69.

29. Тюрин В.А. Повышение качества непрерывнолитой заготовки // Сталь. 2000. № 12. С. 13 – 15.

30. Маточкин В.А., Стеблов А.Б., Оленченко А.В. Идея «мягкого» обжата как способ управления усадочными и ликвационными процессами при затвердевании непрерывнолитых заготовок // Литье и металлургия. 2003. № 1. С. 37 – 40.

31. Канн Ю.Е. Управление качеством непрерывнолитых заготовок // Сталь. 1991. № 1. С. 27 – 28.

32. Скрябин В.Г. Математическое моделирование процессов для АСУ выплавки // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. № 10. С. 98 – 100.

УДК 669.046: 536.12: 518.61

**В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (ИТМО НАН Беларуси),  
**И.А. ТРУСОВА**, канд. техн. наук, **Д.Н. АНДРИАНОВ**, канд. техн. наук,  
**С.М. КАБИШОВ**, канд. техн. наук (БНТУ),  
**В.А. ТИЩЕНКО**, канд. техн. наук,  
**В.И. ЩЕРБАКОВ**, **И.В. КОТОВ** (РУП «БМЗ»)

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ СТАНОВ 320 И 850 РУП «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

Идеология комплексных исследований промышленных агрегатов нашла широкое применение в практике металлургического производства. Преимущества совместного проведения теоретических и экспериментальных исследований очевидны. С одной стороны, экспериментальные данные позволяют оценить реальное состояние конкретного устройства, с другой – выполнить параметрическую настройку математической модели исследуемого процесса,

что в итоге дает возможность с помощью численных расчетов оптимизировать либо изучить работу агрегата, варьируя технологические параметры.

В статье изложены результаты комплексных исследований нагревательных печей станом 320 и 850 РУП «БМЗ». Целесообразность исследований тепловой работы данных нагревательных печей обусловлена прежде всего тем, что они эксплуатируются без капитального ремонта в течение достаточно длительного времени.

Наибольший интерес представляют экспериментальные данные, полученные на нагревательных устройствах в промышленных условиях. Методика проведения экспериментов, разработанная совместно специалистами комплексной научно-производственной лаборатории «Проблемы металлургического производства» (КНПЛ «ПМП») и РУП «БМЗ», описана в работах [1 – 4], поэтому более подробно остановимся на результатах исследований, проведенных в период 2003 – 2004 гг.

**Экспериментальные и теоретические исследования тепловой работы нагревательной печи стана 320.** Нагревательная печь с шагающими балками и шагающим подом стана 320 (рис. 1) (до 2000 г. стан 320/150) введена в эксплуатацию при освоении первой очереди РУП «БМЗ» в 1984 г. Она предназначена для нагрева непрерывнолитых и катаных заготовок сечением 125×125 мм и 140×140 мм длиной 10,3...12,0 м. На участке шагающих балок печь оборудована шестью длиннофакельными горелками типа FR-7, установленными на боковых стенах ниже уровня балок. Остальные зоны отапливаются плоскопламенными газогорелочными устройствами типа ВФМ. Воздух горения подогревается в рекуператоре до температуры 450 °С.

При освоении второй очереди РУП «БМЗ» (1987 – 1988 гг.) в составе прокатного стана 850 пущена в эксплуатацию нагревательная печь с шагающими балками (рис. 2). Печь общей длиной 23,34 м имеет одну неотпливаемую и семь отапливаемых зон (три верхние и четыре нижние), оборудована рекуператором, обеспечивающим подогрев воздуха до 450...550 °С. В нижних зонах (2, 4, 6 и 7) установлено восемнадцать боковых длиннофакельных горелок типа НТР Bloom-1200, а в верхних зонах (1, 3 и 5) – двадцать семь сводовых плоскопламенных горелок типа НТР Bloom-2110.

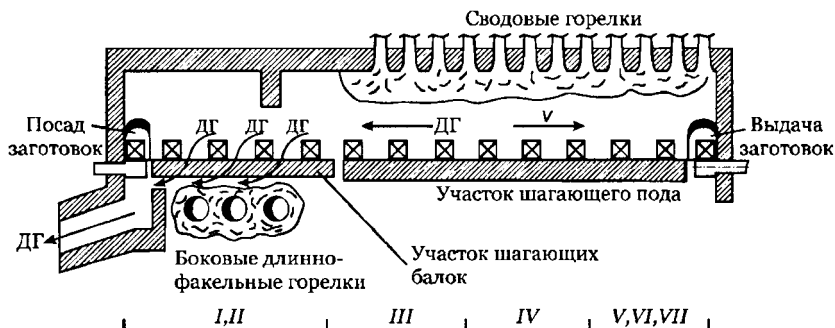


Рис. 1. Схема нагревательной с комбинированным подом печи стана 320

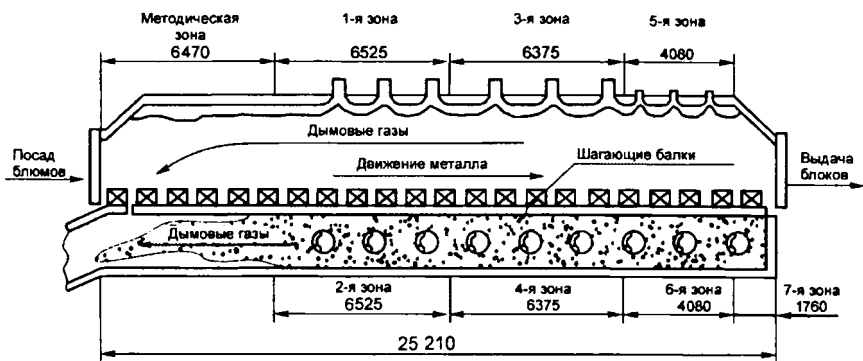


Рис. 2. Схема нагревательной печи с шагающими балками стана 850

Специалистами КНПЛ «ПМП» и РУП «БМЗ» были выполнены экспериментальные исследования по изучению фактической динамики нагрева металла в нагревательной печи стана 320 при зачеканивании термопар в сечение непрерывнолитой заготовки размерами 125×125×11 800 мм.

С целью детального изучения тепловой работы печи проведены три эксперимента при различной тепловой мощности печи, в ходе которых 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.), что позволило в итоге определить фактические теплотехнические параметры печи в период проведения исследований.

При проведении первого и второго экспериментов измерялась температура в центре заготовки как в наиболее характерной точке сечения. Именно по этим значениям можно реально оценить, насколько прогрета заготовка в момент выхода из печи. На рис. 3, а (эксперимент I) и рис. 3, б (эксперимент II) представлена динамика изменения температуры в указанной точке сечения заготовки. И в первом (рис. 3, а), и во втором (рис. 3, б) случае 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 скачок температуры, но скорость нагрева не превышает указанных ранее значений. Требуемой температуры (1190...1200 °С) заготовка достигает уже в начале томильной зоны.

О температурном перепаде по сечению заготовки судить, исходя из экспериментальных данных, невозможно, 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 равен практически нескольким градусам. А это значит, что можно сократить время нагрева и тем повысить производительность печи без ущерба для качества нагрева.

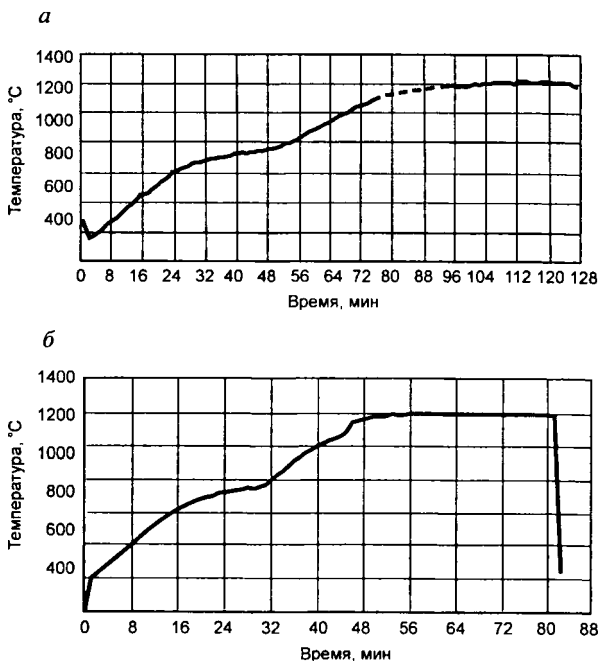


Рис. 3. Динамика изменения температуры в центре заготовки сечением 125×125 мм из стали Ст3 при нагреве в печи стана 320:  
 а – эксперимент I; б – эксперимент II

С целью анализа теплотехнических характеристик нагревательной печи стана 320 по результатам экспериментов 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 экспериментами) позволяет сэкономить 5,7 кг у.т./т; КПД печи при этом возрастает с 43,75 до 48,33%. Вместе с тем эти данные свидетельствуют о неудовлетворительной тепловой работе печи и горелочных устройств.

С целью определения путей дальнейшего совершенствования режимов работы исследуемого агрегата и оценки фактического состояния оборудования печи был проведен третий эксперимент по определению динамики нагрева мелкосортных заготовок сечением 125×125 мм. При этом измерялась температура в центре заготовки, в середине и на ребрах верхней и нижней граней. Полученные данные позволяют реально оценить температурное поле заготовки в процессе нагрева. Результаты эксперимента представлены на рис. 4. Следует отметить, что при проведении данного эксперимента печь уже работала по новому температурному режиму. Данные термометрирования показывают, что в методической зоне температура исследуемой заготовки плавно повышается до 680...750 °С. При этом

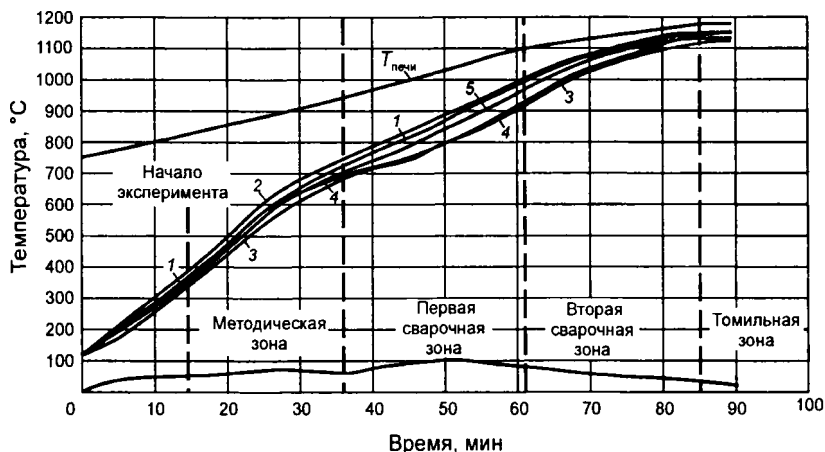


Рис. 4. Динамика изменения температур в контрольных точках заготовки сечением 125×125 мм из стали Ст3 при нагреве в печи стана 320:

1 – середина – верх; 2 – угол – верх; 3 – центр; 5 – угол – низ

скорость роста температуры составляет 17...20 град/мин, температурный перепад по сечению не превышает 70 °С. К середине первой сварочной зоны наблюдается увеличение температурного перепада до 110 °С. Требуемой температуры (1160...1170 °С) поверхность заготовки достигает уже в начале томильной зоны, где происходит дальнейшее выравнивание температурного поля.

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, составил 42,3 кг у.т/т при производительности печи 110 т/ч. Теоретическая оценка этого же показателя при посадке в печь металла с начальной температурой, равной температуре окружающей среды, при прочих равных условиях дала результат, равный 45,4 кг у.т/т. Вместе с тем, согласно данным [1, 5], где приведены результаты исследования 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. Более детальный анализ тепловой работы печи показал износ футеровки и неудовлетворительную работу газогорелочных устройств, что приводит к увеличению топливопотребления и выбросов вредных веществ ( $\text{NO}_x$ ).

Комплексные исследования тепловой работы печи с шагающими балками стана 850. Технологической особенностью процесса нагрева в печи стана 850 является организация горячего посада заготовок. В технической литературе, освещающей проблематику экспериментальных исследований процессов нагрева в печах прокатного производства, отсутствуют сведения об исследовании динамики нагрева непрерывнолитых

заготовок при организации горячего посада. Учитывая сказанное, специалисты БНТУ и РУП «БМЗ» разработали методику проведения уникального эксперимента, позволяющую оценить температурное поле заготовки при горячем посаде. Объектом исследований явилась непрерывнолитая заготовка из стали ШХ15СГ, производство которой освоено на РУП «БМЗ» в 2001 – 2002 гг. в соответствии с программой импортозамещения [6].

Методика проведения эксперимента включала следующие этапы:

1) в методической зоне печи предварительно были проделаны технологическое отверстие в своде диаметром 28 мм и смотровое окно в боковой стене в одной плоскости с ним;

2) заготовку размерами 250×300×5300 мм из стали ШХ15СГ загрузили в нагревательную печь и выдерживали в методической зоне при постоянной температуре (в связи с перевалкой печь работала вхолостую);

3) опытную заготовку подавали под технологическое отверстие в своде печи, через которое опускались термомпары. С помощью крюков через смотровое окно их вставляли в заранее просверленные отверстия. В качестве вторичного прибора использовался потенциометр HoneyWell VRX-100;

4) при достижении температурой заготовки среднemasсовой температуры, удовлетворяющей требованиям технологической инструкции при организации горячего посада, заготовку переместили к началу методической зоны, и далее печь работала в нормальном режиме;

5) после перемещения заготовки к окну выдачи термомпары были отсоединены от потенциометра. При выдаче металла термомпары извлекли из заготовки и с помощью крюков вытащили из печи. Исследуемая заготовка по рольгангу была отправлена на аварийный стол, где с нее были взяты пробы окалины.

На рис. 5 представлена динамика изменения температур центра и угла заготовки сечением 250×300 мм из стали ШХ15СГ при нагреве в печи стана 850. В первом случае (рис. 5, а) заготовка была предварительно нагрета в методической зоне до температур: угол – 856 °С, центр – 716 °С. Как видим, в процессе нагрева температурный перепад вначале увеличился до 230 °С (сварочная зона), а к началу томильной зоны уменьшился до 30 °С. Максимальная скорость нагрева для поверхности наблюдалась в начале сварочной зоны и достигала 7,4 град /мин, а для центра в конце сварочной зоны – 13 град /мин. К середине томильной зоны температурный перепад по сечению заготовки не превышал 5 °С. Средняя температура металла на выдаче составила 1214 °С.

Анализируя результаты второго эксперимента (рис. 5, б), следует отметить, что в конце предварительного нагрева заготовки в методической зоне температуры в исследуемых точках несколько превышали значения, полученные в предыдущем случае, и составляли 762 °С в центре и 888 °С в углу заготовки. Максимальный температурный перепад по сечению заготовки наблюдался, как и при проведении первого эксперимента, в начале

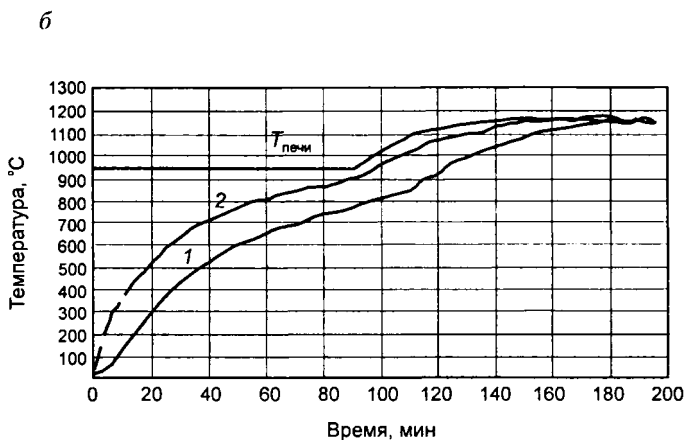
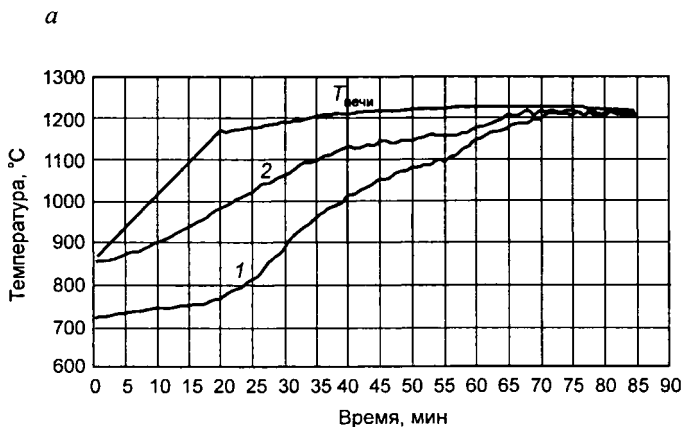


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований нагрева заготовки сечением 250×300 мм из стали ШХ15СГ в печи стана 850 (горячий посад)

сварочной зоны и был равен 162 °С. Уменьшение неравномерности нагрева металла объясняется более низкой производительностью печи во время второго эксперимента и, как следствие, – меньшей скоростью нагрева. К середине томильной зоны (180-я минута эксперимента) температурное поле заготовки выровнялось, и значения температур в центре и углу различались весьма незначительно (рис. 5, б). Данный факт позволил предположить, что потенциал печи используется не полностью и есть возможность сократить время нагрева и тем самым повысить производительность печи без ущерба качеству нагрева. Конечная температура нагрева металла была ограничена 1150...1160 °С, что объясняется технологическими особенностями производства проката из шарикоподшипниковой стали и ее пластическими свойствами вблизи температуры солидус.

Анализ результатов расчета тепловых балансов показал, что удельный расход условного топлива в зависимости от производительности при горячем посаде находится в пределах 21...26 кг у.т/т, КПД составляет 50...55%. Сравнивая полученные данные с показателями работы зарубежных аналогов, можно сделать вывод, что существуют резервы увеличения производительности, сокращения расхода природного газа.

Разработка рациональных режимов нагрева металла в нагревательных печах станков 320 и 850. Для разработки оптимальных режимов нагрева, обеспечивающих минимизацию расхода топлива, в качестве математического аппарата был использован метод магистральной асимптотической оптимизации, разработанный в БНТУ и достаточно хорошо зарекомендовавший себя при решении ряда промышленных задач, в частности задач нагрева [5, 7, 8]. Особенностью данного алгоритма оптимального управления является то, что управление динамикой изменения температур греющей среды и металла осуществляется посредством изменения мгновенного расхода топлива.

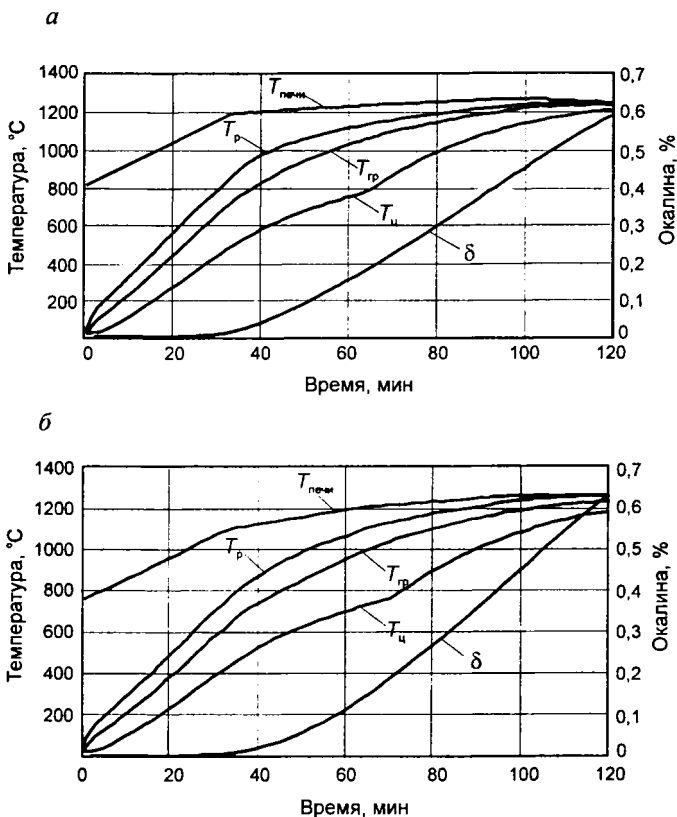
Сформулированный алгоритм был использован для разработки оптимальных режимов нагрева стали в печах станков 320 и 850. Анализ полученного распределения топлива по длине печи позволил сделать вывод, что с целью снижения топливопотребления и окалинообразования следует на 10...20 °С снизить температуру в первой сварочной зоне и на столько же повысить во второй. При этом, учитывая, что часть теплового потока в нижних отапливаемых зонах поглощается водоохлаждаемыми балками, в данных зонах необходимо поддерживать температуру на 20–40 °С выше, чем в верхних.

Для примера сравним динамику изменения температур в центре и середине верхней грани заготовки сечением 250×300 мм из стали 70К при нагреве в печи стана 850 по заводскому (рис. 6, а) и новому (рис. 6, б) режимам. Предлагаемый режим позволяет при сохранении качества нагрева металла снизить количество окалины на 0,42...0,50 кг/т, а удельный расход условного топлива – на 1,1...1,5 кг у.т/т.

Аналогичным образом осуществлен поиск рациональных режимов нагрева стали в печи стана 320, в результате внедрения которых удельный расход условного топлива при нагреве мелкосортных заготовок сечением 125×125 мм уменьшился на 0,50...1,55 кг у.т/т, а количество окалины – на 1,3...2,2 кг/т.

Таким образом, разработана методология комплексных исследований нагревательных печей современной конструкции, включающая экспериментальное и теоретическое изучение внутреннего теплообмена с учетом конструктивных и технологических особенностей исследуемой печи. При этом сформулирована методика проведения экспериментальных исследований температурного поля заготовок при нагреве с холодного и горячего посада.





**Рис. 6.** Изменение температуры в характерных точках заготовки сечением 250×300 мм из стали 70К при нагреве в печи стана 850:  
*a* – по заводскому режиму; *b* – по новому режиму

По результатам выполненных научных исследований были разработаны и внедрены в производство рациональные режимы нагрева средне- и мелкосортных непрерывнолитых и катаных заготовок в печах станов 320 и 850. Это позволило достичь показателей работы печных агрегатов РУП «БМЗ» (удельный расход условного топлива, КПД печи, коэффициент использования топлива), соответствующих показателям лучших мировых аналогов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Стальной слиток: В 3 т. Т. 3: Нагрев / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Самойлович, И.А. Трусова, В.В. Филиппов; под общ. ред. В.И. Тимошпольского, Ю.А. Самойловича. Мн.: Бел. наука, 2001. 879 с.

2. Энергоэкологические испытания печей с шагающими балками / Б.С. Сокола, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова и др. // Сталь. 1991. № 7. С. 52 – 56.
3. Комплексная методология разработки экономичных режимов нагрева стали в печах / В.И. Тимошпольский, В.А. Тищенко, С.М. Козлов и др. // Сталь. 2002. № 10. С. 102 – 107.
4. Новые экспериментальные исследования процессов нагрева металла в печах с механизированным подом / В.И. Тимошпольский, В.А. Тищенко, И.А. Трусова и др. // Литье и металлургия. 2002. № 4. С. 148 – 153.
5. Тимошпольский В.И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Наука и техника, 1995. 256 с.
6. Теплотехнологические режимы при производстве импортозамещающей металлопродукции в условиях РУП «Белорусский металлургический завод» / Ю.Я. Самойлович, В.И. Тимошпольский, Г.А. Анисович и др. // Изв. вузов и энерг. объедин. СНГ. Энергетика. 2002. № 6. С. 57 – 68.
7. Управление температурным режимом нагрева металла по минимуму окисления / В.Б. Ковалевский, В.И. Тимошпольский, А.А. Терлеев и др. // Изв. вузов. Энергетика. 1993. № 5-6. С. 125 – 128.
8. Управление режимом нагрева металла в печах при минимизации расхода топлива / Г.А. Анисович, В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова и др. // Вестн НАНБ. Сер. физ.-техн. навук. 2000. № 3. С. 120 – 123.

*УДК 669.12.09*

**Ю.А. САМОЙЛОВИЧ**, д-р техн. наук (НПП «Платан»,  
г. Екатеринбург, Россия),  
**В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ**, д-р техн. наук (ИТМО НАН Беларуси),  
**Д.Н. АНДРИАНОВ**, канд. техн. наук, **Е.В. КАЛИНЕВИЧ** (БНТУ)

## **УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НАГРЕВАЕМЫХ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВКАХ**

В настоящее время при анализе термических напряжений в стальных заготовках, нагреваемых в пламенных печах перед прокаткой, используются упрощенные методы, базирующиеся на решении простейших задач термоупругости [1]. Между тем, в большинстве практических случаев наблюдается весьма существенная нелинейная зависимость физических свойств стали от температуры в интервале температур тепловой обработки стальных изделий (слябов, блюмов) при их нагреве в пламенных печах.

На рис. 1 в качестве примера приводится зависимость от температуры коэффициента теплопроводности стали трех марок (ШХ15, 30ХН3, Р18). Обращает на себя внимание тот факт, что в интервале температур от 800 до 1200 К происходит почти двукратное уменьшение коэффициента теплопроводности стали ШХ15, что обусловлено протеканием фазовых