

Предложена методика оценки экономической целесообразности применения органического топлива в процессе выплавки стали в дуговых печах, заключающаяся в определении энергетического эквивалента электрической энергии, вводимой в печь, в стоимостном выражении при замене ее энергией сжигания органического топлива, а также методика оценки эффективности применения металлошихты определенного химического состава.

УДК 621.746

Ю. А. САМОЙЛОВИЧ, д-р техн. наук (Екатеринбург, «Платан»),  
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук,  
И. А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,  
С. М. КАБИШОВ, канд. техн. наук. (БНТУ)

## СНИЖЕНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТАЛЬНЫХ СЛИТКОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Для снижения химической неоднородности стальных слитков применяются разнообразные методы внешних воздействий, к числу которых относится пропускание электрического тока через кристаллизующийся расплав. В настоящей статье приводятся примеры снижения химической неоднородности стальных слитков при пропускании электрического тока и соображения о возможном механизме воздействия электрического тока на процесс кристаллизации стали. Реализация идеи воздействия электрического тока на затвердевающий стальной слиток сталкивается с чисто техническим затруднением, связанным со способом подключения электрического тока к слитку. Известно, что при непрерывной разливке стали используется индукционный метод электромагнитного перемешивания расплава, при котором индукторы расположены на определенном расстоянии (несколько сантиметров) от поверхности заготовки. Подобные устройства, основанные на применении бегущего электромагнитного поля, отличаются низким коэффициентом полезного действия, использованием источников тока повышенной мощности (до  $1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ), т. е. являются весьма дорогостоящими.

Альтернативой индукционному методу перемешивания расплава являются представленные ниже технические устройства, для которых характерно подключение электрического тока непосредственно к затвердевающему слитку. Подобные устройства различаются использованием постоянного либо переменного (импульсного) электрического тока, а также сочетанием электрического и магнитного полей.

**Постоянный электрический ток.** На рис. 1 представлена схема электрошлакового обогрева (ЭШО) головной части стального слитка, затвердевающего в чугунной изложнице. Известно, что формирование стальных слитков в изложницах сопровождается большими непроизводительными отходами металла в связи с образованием глубокой усачной раковины в верхней части слитков.

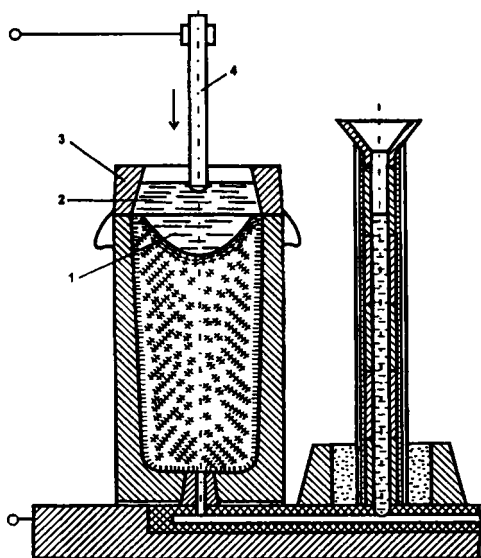


Рис. 1. Схема подвода электрического тока к стальному слитку, затвердевающему в изложнице: 1 – металлическая ванна; 2 – шлаковая ванна; 3 – прибыльная надставка; 4 – расходный электрод

В соответствии со схемой ЭШО, предложенной в [1], постоянный электрический ток подводится с помощью нерасходуемого электрода к шлаковой ванне, заполняющей прибыльную надставку изложницы.

цы. Электрическая цепь включает источник тока, электрод, шлаковую ванну и затвердевающий расплав: при прямой полярности электрод играет роль катода, слиток – роль анода; при обратной полярности – наоборот. Выделение джоулевой теплоты при прохождении электрического тока через шлаковую ванну приводит к разогреву шлака, что предупреждает образование «мостов» в головной части слитка и уменьшает глубину усадочной раковины. В то же время шлаковая ванна надежно изолирует поверхность металла от контакта с атмосферой, что способствует сокращению количества оксидов в стали. По данным [1], расход электроэнергии при использовании метода ЭШО составляет 15–18 кВт · ч.

В работе [2] изложены результаты изучения воздействия постоянного электрического тока на кристаллизацию опытных слитков массой 350 кг при электрошлаковом обогреве их головной части. На рис. 2 представлены результаты распределения сульфидов в опытных слитках, отливаемых при прямой (а) и обратной (б) полярности, а также при использовании переменного тока промышленной частоты (в). Судя по данным химического и металлографического анализа, при использовании постоянного тока обратной полярности выделяющиеся в слитке сульфидные включения отличаются более высокой дисперсностью по сравнению с током прямой полярности.

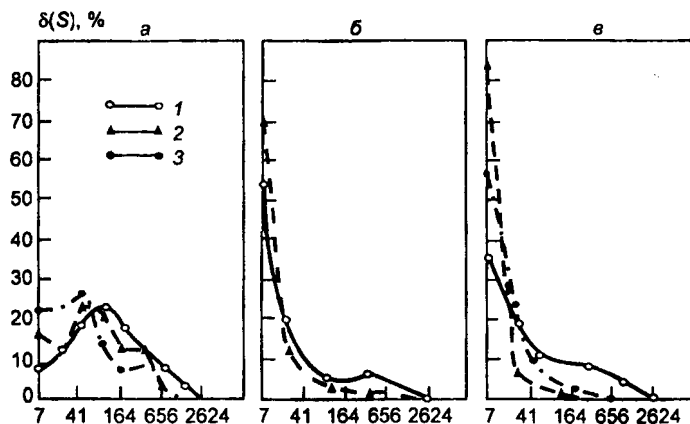


Рис. 2. Распределение сульфидов по размерам в опытном стальном слитке массой 350 кг по данным [4]: а – прямая полярность тока; б – обратная полярность тока; в – переменный ток; 1 – зона шнуровой сегрегации; 2 – на расстоянии 5 см от «шнура»; 3 – на расстоянии, большем 5 см от «шнура»

По мнению авторов [2], использование тока обратной полярности позволяет получить в стальном слитке распределение сульфидов, характерное для периферийной (высококачественной) зоны стальных слитков. Напротив, применение тока прямой полярности способствует возникновению нежелательных скоплений сульфидных включений типа «шнуровой» ликвации. Промышленная проверка обработки постоянным током стальных слитков массой 5–7 т (из стали 9Х2) подтвердила результаты лабораторных исследований: при обратной полярности тока ликвационные явления в литой стали выражены значительно слабее, чем при прямой. При объяснении полученного эффекта авторы [2] опираются на представления современной теории электролиза, согласно которым жидкая и твердая фазы стального слитка играют роль электролита и электрода соответственно. Следует отметить, что электродиффузия элементов в расплаве чугуна и стали известна достаточно давно. В частности, в работе М. А. Рабкина [3] обнаружено диффузионное перемещение ионов углерода в расплавленном чугуне, что соответствует представлению о том, что в расплаве на основе железа углерод присутствует в форме положительно заряженных ионов. Более детальное изучение электролитических свойств различных элементов в расплаве меди, серебра и железа представлено в [4–7].

Основной результат этих исследований сводится к следующему заключению: знак и величина эффективного заряда диффундирующей при электропереносе примеси существенно зависят от характера проводимости среды (расплава). Для расплава меди и серебра характерна электронная проводимость: при этом направление внешней электродвижущей силы совпадает с направлением «электронного ветра» и эффективные заряды серы, фосфора и кремния являются отрицательными. Это объясняет, почему указанные элементы в результате электролизного процесса в расплавах меди и серебра скапливаются у положительного полюса (анода). Расплав железа обладает специфическими по сравнению с медью и серебром свойствами проводимости. Эта специфика состоит в том, что расплав железа характеризуется наличием большого количества вакантных связей атомов, которые в отсутствие внешнего поля хаотически блуждают от одного атома к другому.

При наличии внешнего электрического поля часть связанных электронов начинает взаимодействовать с вакантными связями, при этом возникает поток связанных электронов, движущихся против

внешнего поля. Механизм проводимости при помощи связанных электронов называют «дырочной» проводимостью. В металлическом расплаве с электронной проводимостью (медь, серебро) эффективные заряды примесей (серы, фосфора, кремния) являются отрицательными, а ионы указанных примесей мигрируют к аноду.

В расплаве железа преобладает дырочный механизм проводимости, в связи с чем ионы указанных выше примесей мигрируют к катоду. Этим объясняется эмпирический факт уменьшения степени обогащения расплава серой и фосфором при наложении на затвердевающий стальной слиток электрического поля с обратной полярностью.

**Пульсирующий электрический ток.** Практическая реализация обработки затвердевающих стальных слитков постоянным электрическим полем затрудняется тем обстоятельством, что протекание постоянного тока в расплаве сопровождается значительными тепловыми потерями. Этот недостаток удается в определенной мере преодолеть при обработке затвердевающего расплава не постоянным, а пульсирующим электрическим током, импульсы которого характеризуются низкими средними значениями силы тока. Принципиальная схема установки для электроимпульсной обработки слитков представлена на рис. 3 [9, 10]. После заполнения изложницы 4 через жидкий металл пропускали ток от импульсного генератора 1, который подключали к изложнице и электроду 2, вводимому в прибыльную часть слитка. Электрообработка проводилась в течение всего времени кристаллизации расплава до момента завершения кристаллизации слитка. Эксперименты проводили для двух групп слитков массой 25 кг и 1,8 т из стали марок У7 и 1Х18Н9Т. Результаты исследования химической неоднородности по сечению слитков (для углерода и серы) представлены на рис. 4. Из графиков рис. 4 следует, что в результате электроимпульсной обработки максимальная ликвация углерода и серы снижается в 2,2–3,4 раза. При этом на оси слитков наблюдается изменение знака ликвации: из положительной ликвации (полученной на контрольных слитках, отлитых без электрообработки) до отрицательной!

Для объяснения столь существенного воздействия импульсной электрообработки стальных слитков на степень зональной сегрегации углерода и серы привлекается представление об эффекте Пельтье, сущность которого состоит в следующем [11, 12]. При

протекании через фронт кристаллизации тока определенной полярности возникает термоэлектрический эффект, сопровождающийся поглощением теплоты. При действии импульсов электрического тока достаточно большой силы количество поглощаемой теплоты за счет эффекта Пельтье превышает количество выделяемой теплоты фазового перехода (джоулева теплота) и на границе фронта кристаллизации возникает череда импульсов локального переохлаждения, что приводит к повышению скорости кристаллизации расплава.

Рис. 3. Схема электроимпульсной обработки затвердевающего слитка: 1 – генератор импульсного тока; 2 – электрод; 3 – прибыльная надставка; 4 – изложница; 5 – жидкая сердцевина слитка; 6 – затвердевшая часть слитка

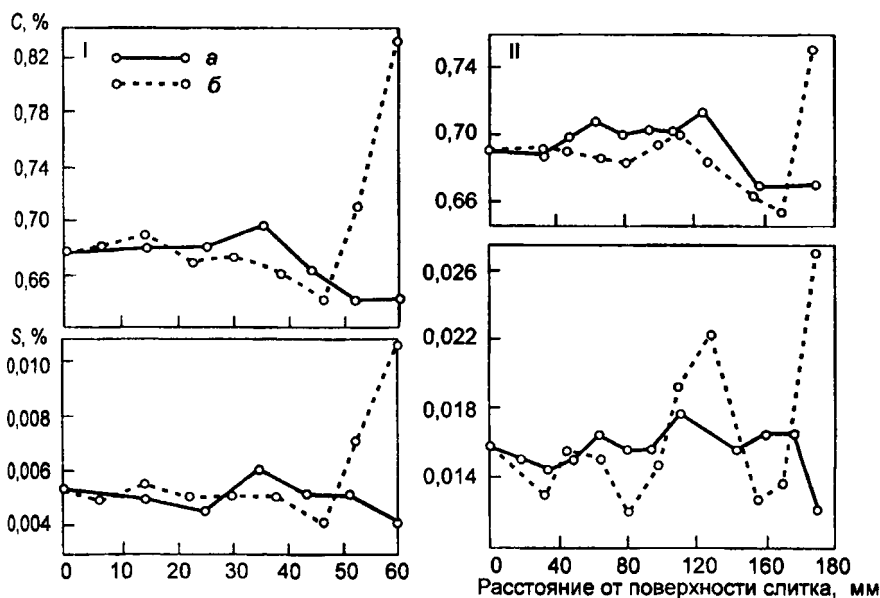
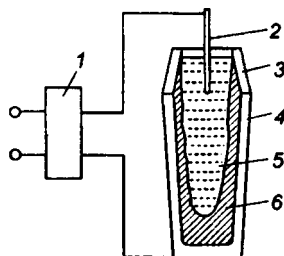


Рис. 4. Влияние импульсной электрообработки расплава: а – на распределение углерода и серы по сечению стальных слитков сечением 120×120 мм (1) и 380×380 мм (2); б – показатели для обычных слитков

Электроимпульсная обработка приводит к существенному изменению макроструктуры стальных слитков: зона столбчатых кристаллов сокращается на 10–12 %, дисперсность кристаллитов увеличивается в 1,5 раза.

Особенность эффекта Пельтье состоит в том, что поглощение теплоты у границы раздела фаз происходит практически мгновенно и локализуется непосредственно на указанной границе, где протекает процесс разделительной диффузии, приводящий к ликвации примесей. Именно эта особенность позволяет избежать «размывания» локальных участков переохлаждения и тем самым существенно повысить локальную скорость кристаллизации расплава, что и ведет к повышению показателей качества литой стали. Необходимо отметить, что в общей теории эффекта Пельтье [11, 12] используется представление о пропускании через границу раздела фаз электрического тока постоянной силы  $I$ , а величина коэффициента термоЭДС  $\alpha_p$  в общей формуле, связывающей поглощаемую тепловую мощность  $q_p$  с силой тока ( $I_p = (\alpha_p)T_1$ ), известна лишь для ограниченного ряда металлов (Zn, Bi, Cs, Ge) и некоторых полупроводников. Для случая импульсной подачи электрического тока через фронт кристаллизации сплавов на основе железа теория проявления эффекта Пельтье в настоящее время отсутствует, что затрудняет оценку необходимых параметров системы электроимпульсной обработки стальных слитков различной массы и различного химического состава.

**Постоянный электрический ток плюс постоянное магнитное поле.** Изложенные выше методы воздействия электрического тока на процесс кристаллизации слитка получают объяснение на основе представлений о различном механизме проводимости металла непосредственно у границы раздела фаз. Вместе с тем в практике непрерывного литья стали широко используется метод электромагнитного перемешивания (ЭМП), основанный на воздействии потока жидкой стали на фронт кристаллизации заготовки. При этом движение расплава в незатвердевшей части заготовки обусловлено действием бегущего электромагнитного поля, которое обеспечивается с помощью индукторов, расположенных в непосредственной близости от поверхности заготовки, но не соприкасающихся с ней. Практикуется размещение индукторов непосредственно в кристаллизаторе либо в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ с применением пониженной частоты бегущего поля (0,5–3 Гц) и повышенной мощности (500–1000 кВ · А).

Столь высокие значения мощности тока при использовании индукционного метода перемешивания обусловлены высоким уровнем потерь в зазоре между полюсами индукторов и поверхностью заготовки.

Как показано в ряде исследований [8, 13–16], движение расплава в незатвердевшей части непрерывно литых заготовок можно организовать при существенной экономии затрат при использовании эффекта движения электропроводной жидкости (расплава стали) в скрещенных постоянных электрическом и магнитном полях. При этом удается использовать опорные ролики МНЛЗ в качестве магнитопроводов и токоподводов к поверхности заготовки, как показано на рис. 5. Результаты модельных экспериментов и расчетов [8] позволяют установить базовую зависимость между скоростью течения расплава перед фронтом кристаллизации заготовки  $V$  (м/с), плотностью электрического тока  $j$  (А/м<sup>2</sup>) и магнитной индукцией  $B$  (Тл)

$$V = k \sqrt{jBL / \rho},$$

где  $L$  (м) – протяженность контура циркуляции;  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) – массовая плотность расплава;  $k$  – эмпирическая константа.

На рис. 6 представлена полученная расчетом картина распределения функции тока и скорости движения расплава при использовании одной (а) либо трех (б) пар опорных ферромагнитных роликов, размещаемых в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ. Как видно из графиков рис. 6, максимальные значения скорости течения расплава у фронта кристаллизации заготовки достигают значений 0,15–0,2 м/с, что оказывается вполне достаточным для активного воздействия на характер кристаллической структуры затвердевающей стальной заготовки.

Организация движения расплава в жидком ядре затвердевающих отливок при использовании скрещенных (и постоянных) электрического и магнитного полей получила название «кондукционное электромагнитное перемешивание» (КЭМП). Приведем результаты промышленной апробации метода КЭМП при непрерывном литье сортовых стальных заготовок поперечным сечением 300×400 мм [8]. При этом в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ размещали два яруса ферромагнитных роликов, расположенных на расстоянии 1,7 и 2,8 м от зеркала расплава в кристаллизаторе. Скорость литья варьировали в пределах 0,5–0,75 м/с, перегрев металла в промежуточном ковше не превышал 20–50°, расход воды в зоне вторичного охлаждения – 0,3–0,4 л/кг. Электромагнитная система КЭМП обеспечила значения маг-



нитной индукции в центре стальной заготовки порядка 0,13 Тл, максимальная сила постоянного тока, пропускаемого через заготовку, не превышала 2500 А; средний расход электроэнергии составил 80 кВт · А.

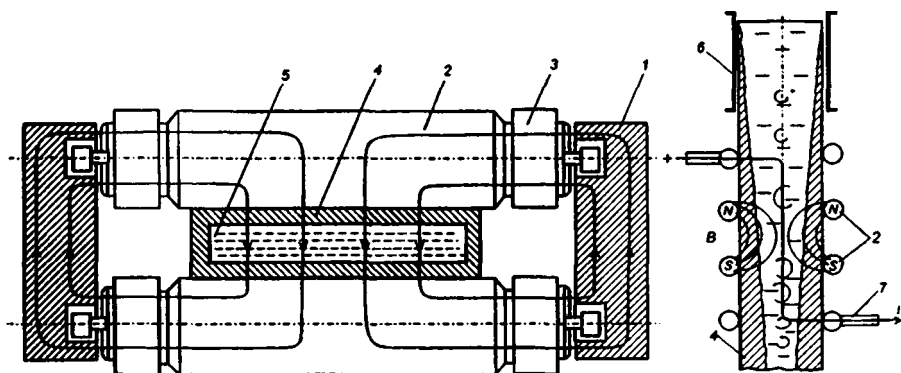


Рис. 5. Схема устройства для использования опорных роликов МНЦ в качестве элементов электромагнита: 1 – замыкающее ярмо; 2 – опорный ролик; 3 – катушка возбуждения; 4 – непрерывнолитая заготовка; 5 – жидкая фаза; 6 – кристаллизатор; 7 – источник постоянного тока

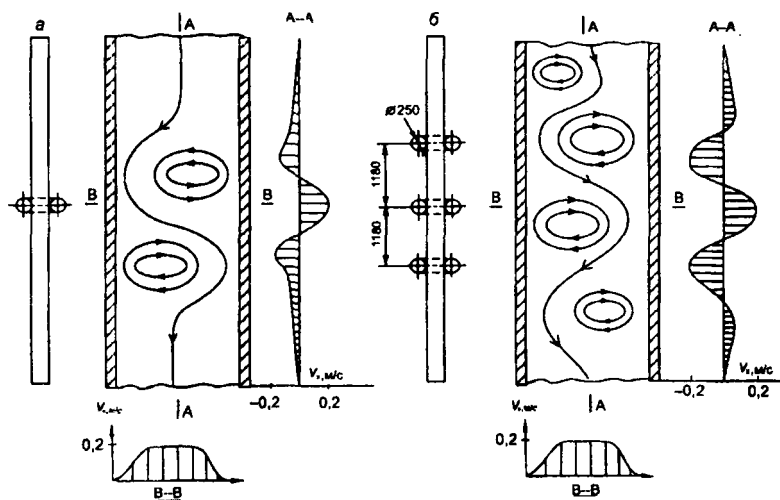


Рис. 6. Распределение изолиний тока и скорости течения расплава в продольном (А-А) и поперечном (В-В) сечениях слитка для случаев, когда перемешивание осуществляется с использованием одной (а) или трех (б) пар опорных роликов [13, 14]

В результате обследования макроструктуры отлитых заготовок показано, что при использовании КЭМП существенно увеличена зона равноосных кристаллов в центральной части заготовок, снижена степень осевой химической неоднородности литой стали.

В работе [15] приводятся результаты применения КЭМП при непрерывном литье листовых стальных заготовок из нержавеющей стали и показано, что при использовании перемешивания достигается существенное расширение зоны равноосных кристаллов (до 50 % от площади сечения заготовки) и степень волнистости холоднокатаного листа толщиной 0,3–0,4 мм уменьшается в четыре раза.

Вместе с тем отмечается, что чрезмерно интенсивное перемешивание жидкой фазы приводит к ярко выраженной отрицательной сегрегации примесей, что приводит к излишней отбраковке проката.

Таким образом, использование скрещенных постоянных электрического и магнитного полей позволяет регулировать соотношение структурных зон в непрерывнолитой заготовке и снижать степень осевой химической неоднородности заготовок – одного из наиболее характерных дефектов литой стали при непрерывном литье. При этом использование метода КЭМП позволяет достигать существенной (в несколько раз) экономии электроэнергии по сравнению с индукционным методом перемешивания при непрерывном литье стали в аналогичных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дудко, Д. А. Комплексное улучшение качества стальных слитков / Д. А. Дудко, Р. Г. Крутиков, К. К. Прохоренко. – Киев: Наук. думка, 1969. – 180 с.
2. Специальные вопросы электротермии: сб. / В. С. Дуб [и др.]. – Чебоксары, 1980. – С. 16–22.
3. Рабкин, М. А. Электролитический перенос углерода в жидких железоуглеродистых сплавах / М. А. Рабкин // Журнал прикладной химии. – 1957. – Т. 30, вып. 5. – С. 791–794.
4. Григорян, В. А. Электроперенос серы в расплавленном серебре / В. А. Григорян, Г. А. Григорьев // Изв. АН СССР. Metallургия и горное дело – 1963. – № 3. – С. 96–97.
5. Григорян, В. А. Электроперенос серы в расплавленном чугуна / В. А. Григорян, Г. А. Григорьев // Изв. вузов. Черная металлургия. – № 3. – С. 140–143.
6. Ватолин, Н. А. Об электропереносе кремния, фосфора и серы в жидком чугуна и меди / Н. А. Ватолин, О. А. Есин, Э. Л. Дубинин // Физика металлов и металловедение. – 1965. – Т. 19, вып. 4. – С. 634–636.
7. Белашенко, Д. К. Исследование расплавов методом электропереноса / Д. К. Белашенко. – М.: Атомиздат, 1974. – 88 с.

8. *Самойлович, Ю. А.* Кристаллизация слитка в электромагнитном поле / Ю. А. Самойлович. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
9. Улучшение технологии производства крупных слитков / И. Р. Кряннин [и др.] // *Сталь*. – 1988. – № 4. – С. 31–34.
10. *Манохин, А. И.* Снижение зональной ликвации в слитках стали У7 и 1Х18Н9Т электроимпульсной обработкой при затвердевании / А. И. Манохин, Г. Т. Мальцев // *Сталь*. – 1990. – № 9. – С. 65–67.
11. *Иоффе, А. Ф.* Полупроводниковые элементы / А. Ф. Иоффе. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1956. – 104 с.
12. *Калашников, С. Г.* Электричество / С. Г. Калашников. – 4-е изд. – М.: Наука 1977. – 592 с.
13. Электровихревой метод перемешивания расплава в жидком ядре заготовок при непрерывном литье / Ю. А. Самойлович [и др.] // *Вестн НАНБ, серия физ.-техн. наук*. – 2001. – № 2. – С. 125–128.
14. Закономерности кондуктивного метода электромагнитного перемешивания расплава при непрерывном литье листовых заготовок / Ю. А. Самойлович [и др.] // *Вестн НАНБ, серия физ.-техн. наук*. – 2001. – № 2. – С. 129–132.
15. *Nakatani M., Adachi T., Sugitani J.* // *Journal of Iron and Steel Inst.* – Japan, 1981. – Vol. 67, № 8. – Pp. 1284–1296.
16. *Федотов, В. М.* / В. М. Федотов [и др.] // *Магнитная гидродинамика*. – 1984. – № 4. – С. 95–100.

УДК 669.041

**С. М. КОЗЛОВ**, канд. техн. наук,  
**И. А. ТРУСОВА**, д-р техн. наук,  
**Р. Б. ВАЙС**, канд. техн. наук (БНТУ)

## **УЧЕТ ОКИСЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НАГРЕВА КОРДОВОЙ СТАЛИ В ПЕЧАХ ПАТЕНТИРОВАНИЯ**

Повышение выхода годного металла при нагреве слитков и заготовок, безусловно, представляет собой весьма важную и актуальную производственную задачу.

Как правило, при решении проблем, связанных с минимизацией окисления стали, рассматривают два подхода:

1) разработку оптимальных температурных режимов нагрева (выдержка металла при минимально допустимой с технологической