

2. Непрерывная разливка стали в заготовки крупного сечения / А.И. Чижиков [и др.]. М.: Металлургия, 1970. 136 с.
3. Гуляев, Б.Б. Литейные процессы / Б.Б. Гуляев. М.; Л.: Машгиз, 1960. 416 с.
4. Пюрингер, О.М. Формирование непрерывнолитой заготовки на МНЛЗ / О.М. Пюрингер // Черные металлы: пер. с нем. 1976. № 6. С. 3 – 9.
5. Технология скоростной непрерывной разливки с использованием данных анализа и предотвращение внутренних трещин в слябах / М. Найтоу [и др.] // Новости черной металлургии России и зарубежных стран: пер. с англ. 2000. № 2. С. 68 – 72.
6. Кашталян, Ю.А. Характеристики упругости материалов при высоких температурах / Ю.А. Кашталян. Киев: Наук. думка, 1970. 112 с.
7. Boulanger, C. Influence of Grain Boundaries on Certain Properties of Metals and Alloys near the Melting Point / C. Boulanger // Revue de Metallurgie. 1954. V. 51. P. 219.
8. Hub, D.R. Proceedings of IV-th International Vong Acoustics / D.R. Hub. 1962, 551 p.
9. Пуарье, Ж.П. Ползучесть кристаллов: пер. с англ. / Ж.П. Пуарье. М.: Мир. 1988. 287 с.
10. Нисковских, В.М. Машины непрерывного литья слябовых заготовок / В.М. Нисковских, С.Е. Карлинский, А.Д. Беренов. М.: Металлургия, 1991. 272 с.
11. Пластичность стали при высоких температурах / М.И. Зуев [и др.]. М.: Металлургиздат, 1954. 318 с.
12. Мигачев, Б.А. Пластичность инструментальных сталей и сплавов: справочник / Б.А. Мигачев, А.И. Потапов. М.: Металлургия, 1980. 92 с.
13. Лебедев, В.И. Исследование процесса деформации стали, отлитой непрерывным способом / В.И. Лебедев, Д.П. Евтеев, М.Я. Бровман // Непрерывная разливка стали. 1974. № 2. С. 56–60.
14. Дергунов, И.Д. Определение периода релаксации углеродистых сталей и цветных металлов / И.Д. Дергунов // Журнал технической физики. 1951. Т. 21. Вып. 12. С. 1526–1534.
15. Самойлович, Ю.А. Микрокомпьютер в решении задач кристаллизации слитка / Ю.А. Самойлович. М.: Металлургия, 1988. 182 с.

УДК 669.187.26.001.57

В.А. МАТОЧКИН, канд. техн. наук,
Д.Н. АНДРИАНОВ, канд. техн. наук,
Ю.В. КАРПОВИЧ, К.Н. МИТРИЧЕНКО,
Ф.Г. ГАРЕЕВ (РУП «БМЗ»)

ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА РУП «БМЗ» С ВЕДЕНИЕМ ПЛАВКИ НА ВСПЕНЕННОМ ШЛАКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЛА

Введение. Мировое производство электростали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) постоянно совершенствуется и модернизируется. Это связано с увеличением выплавки стали в дуговых печах, ростом цен на энергоносители, ужесточением конкурентной борьбы за рынки сбыта. Мировой индекс цен на электроэнер-

гию характеризуется опережающим ростом по сравнению с другими промышленными ресурсами, поэтому энергетическая экономичность промышленных процессов, в том числе и при выплавке стали, является важнейшим показателем производства. В связи с этим в электрометаллургии постоянно идет поиск вариантов усовершенствования существующих технологий, позволяющих снизить энергопотребление и в то же время увеличить производительность сталеплавильных агрегатов.

Стоимость современных сталеплавильных агрегатов достаточно высока, и не каждое металлургическое предприятие в состоянии произвести замену устаревших электропечей современными. Однако увеличение себестоимости стали, выплавленной в электропечах, которое вызвано ростом цен на энергоносители (в первую очередь электроэнергию) и другое расходуемое сырье, все более настойчиво требует внедрения ресурсо- и энергосберегающих технологий и соответствующего оборудования. Затраты в этом случае по сравнению со стоимостью новых агрегатов значительно ниже; при этом требуется гораздо меньше времени на реализацию. Поэтому одним из основных направлений совершенствования электросталеплавильного производства в настоящее время является модернизация сталеплавильных агрегатов, направленная на снижение расхода электроэнергии на тонну выплавленной стали.

Исторически сложилось так, что Республика Беларусь из-за отсутствия крупных месторождений топливного сырья и базы для развития альтернативной энергетики вынуждена импортировать как электроэнергию, так и первичные энергоносители (газ, уголь и т.д.). Поэтому проведение политики энергосбережения на таком крупнейшем потребителе энергии, как РУП «БМЗ», является важнейшей стратегической задачей для белорусской экономики в целом.

Реализация последних достижений и современных энергосберегающих технологий на РУП «БМЗ». Первоначально все три печи имели относительно одинаковую энергетическую комплектацию – три стеновые газокислородные горелки мощностью 3,6 МВт каждая для нагрева и «подрезки» лома, через которые подавалась смесь следующего состава и расхода: природный газ – 5,0...6,5 м³/т, кислород – 10,0...14,0, воздух – 2,0...3,0 м³/т при давлении 0,25...0,35; 0,8...1,2 и 0,4...0,6 МПа соответственно. Суммарный расход природного газа на все горелки составлял 1600...1700 м³/ч, кислорода – 3200...3400 м³/ч. Подача кислорода в печь осуществлялась через рабочее окно печи с помощью расходного кислородного копия с интенсивностью 20...25 м³/т и общим расходом 1800...2200 м³/ч. После реконструкции в 1998 г. ДСП № 3 дополнительно была оборудована дверной газокислородной горелкой

мощностью 5 МВт, манипулятором «МАРК-4» для вдувания кислорода и углеродосодержащих материалов через рабочее окно, многофункциональной фурмой со стороны эркера. Раннее начало продувки металла кислородом с помощью манипулятора с интенсивностью 1800...2400 м³/ч и комбинированной эркерной фурмой с интенсивностью 1200...1500 м³/ч, а также применение комплекта из трех топливно-кислородных горелок (ТКГ) позволило сократить длительность плавки на 5...10 мин и выйти на расход электроэнергии 450...460 кВт·ч/т. Вдувание в ванну углеродосодержащего материала (размером 1...4 мм с интенсивностью 5...30 кг/мин и общим удельным расходом 2,5...5,0 кг/т) позволило поддерживать шлак во вспененном состоянии до конца плавления металла, что повысило устойчивость горения дуг и защиту водоохлаждаемых элементов печи от прямого излучения дуги и увеличило срок службы футеровки.

Перспективные направления инъекционных технологий с использованием типового устройства – стеновой фурмы-манипулятора. Одним из путей снижения удельного расхода электроэнергии и соответственно повышения производительности ДСП является внедрение инъекционных технологий плавления металла в печи. Ввиду этого с учетом условий РУП «БМЗ» представляется интересным применение технологии вспенивания шлака в процессе плавления металла в ДСП с использованием многофункциональной стеновой фурмы-манипулятора в качестве агрегата для ввода измельченного мела в электродуговую печь, на границу металл – шлак. Как известно, фурма-манипулятор предполагает несколько режимов: режим режущего кислорода (подрезка шихты в труднодоступных холодных зонах ДСП); вдувание углеродосодержащих материалов в глубину ванны; дожигание монооксида углерода до диоксида с выделением дополнительного количества теплоты для интенсификации плавки; вдувание углеводородов.

Фурма-манипулятор является универсальным средством интенсификации плавки в ДСП, благодаря которому значительно упрощаются технологические операции при выплавке стали и сокращается время плавки под током. Манипулятор предназначен для ввода мультифурмы в амбразуру стеновой панели электропечи и угловых перемещений ствола мультифурмы в пределах амбразуры стеновой панели. Перемещение мультифурмы в ДСП производится гидроцилиндром. На рис. 1 изображена типовая стеновая фурма-манипулятор мультифурмы.

При необходимости стеновая фурма-манипулятор дополнительно может быть снабжена механизмом поворота в горизонтальной плоскости. Угол поворота мультифурмы $\pm 15^\circ$ вполне достаточен для выполнения необходимых технологических операций. Воз-

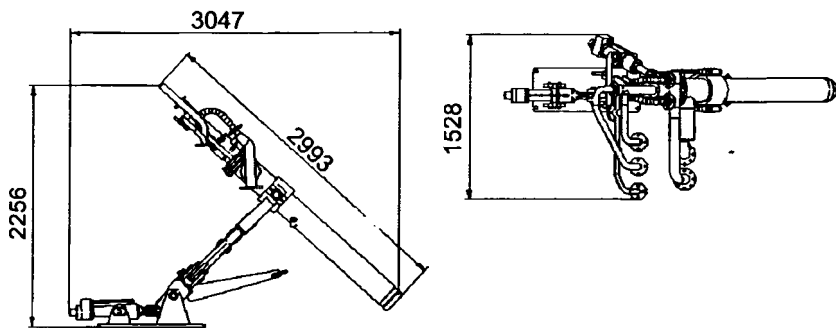


Рис. 1. Стеновая фурма-манипулятор с механизмом поворота

возможность поворота стеновой мультифурмы в горизонтальной плоскости позволяет значительно расширить площадь обрабатываемой ванны и тем самым повысить ее технологичность (рис. 2).

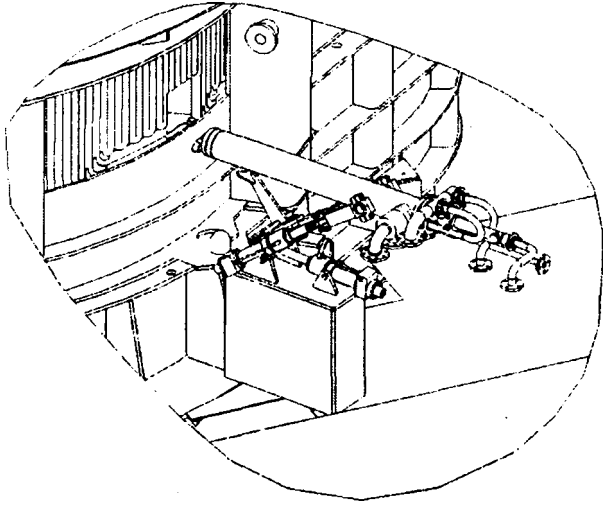
Стеновой манипулятор мультифурмы снабжен механизмом очистки от шлаковых отложений. Для производства ремонтных или регламентных работ, а также защиты других устройств и людей от радиационного излучения сталеплавильной электропечи в комплект манипулятора входит затвор амбразуры, который предназначен для запираания окна ввода стеновой фурмы-манипулятора.

Перспективные направления инъекционных технологий с использованием альтернативного материала – порошкообразного мела. Инъекционные технологии – наиболее приемлемый путь повышения производительности ДСП. В мировой практике такие технологии широко распространены. Продувка металла порошкообразными материалами (или вдувание в металл порошкообразных материалов) проводится с целью обеспечения максимального контакта вдуваемых твердых реагентов с металлом, максимальной скорости взаимодействия реагентов и металла, высокой степени использования вдуваемых реагентов.

Положительная сторона этой технологии состоит в том, что реагент вдувается в металл струей газа-носителя, который сам оказывает определенное воздействие на металл. В качестве газа-носителя используют аргон, азот, кислород, а в качестве вдуваемых реагентов – шлаковые смеси на основе извести, углеродосодержащие материалы.

Использование мела для пенообразования и вспенивания шлака еще мало изучено и не получило широкого распространения, что связано с консервативными взглядами на применение извести и известняка в качестве шлакообразующих материалов. Использо-

а



б

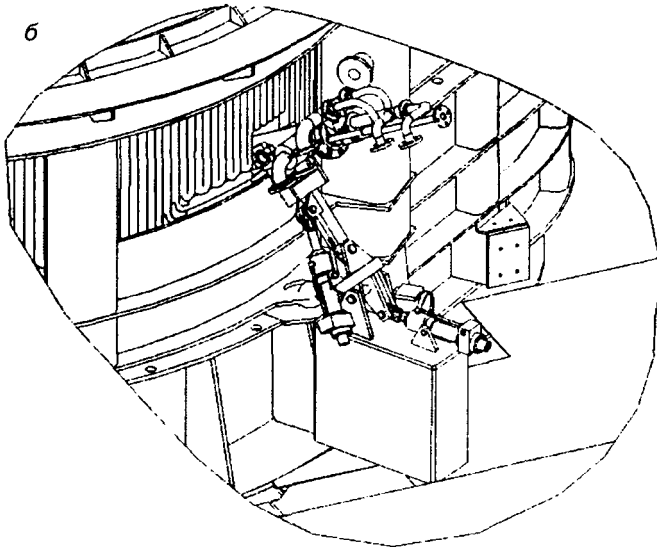


Рис. 2. Стеновая фурма-манипулятор:
а – в стационарном положении; б – в рабочем положении

вание мела как нетрадиционного материала для инъекции в расплав представляется перспективным направлением.

В настоящее время в электросталеплавильном цехе № 1 (ЭСЦ-1) при выплавке стали в ДСП технология вспенивания шлака осуществляется путем подачи кокса и извести из бункеров на поверхность шлака, что не позволяет вводить углерод на границу раздела металл – шлак и не дает возможности достичь оптимального использования материалов и электроэнергии. Значительным недостатком существующей технологии вспенивания является дефицит извести (порядка 15%) и кокса, а также высокая стоимость последнего. Кокс в Республике Беларусь не производится, поэтому его приходится закупать в соседних странах, что приводит к дополнительным затратам как на транспортировку, так и на закупку по импорту.

Мел – землистая горная порода белого цвета, состоящая почти из чистого карбоната кальция (CaCO_3), т.е. имеет такой же химический состав, как и известняк, но отличается по структуре. Химический состав мела карьерной добычи представлен в табл. 1. Известняк имеет более плотную структуру, его плотность – 1800...2600 кг/м³, плотность мела – 950... 1200 кг/м³, следовательно, мел легче поддается дроблению.

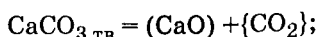
Таблица 1

Химический состав мела карьерной добычи, %

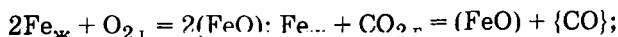
Химический элемент	Мел (МК-1)	Химический элемент	Мел (МК-1)	Химический элемент	Мел (МК-1)
CaCO_3	98,9	Al_2O_3	0,22	SO_3	0,02
MgCO_3	0,23	K_2O	0,04	CO_2	42,5
SiO_2	0,64	SrO	0,08	H_2O	0,43
Fe_2O_3	0,09	Na_2O	0,01		

Инъекция мела на границу металл – шлак приводит к получению следующих реакций:

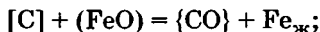
разложение мела



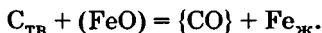
окисление железа металла кислородом дутья и образующимся углекислым газом



окисление углерода расплава на границе фаз шлак – металл образующимся FeO



окисление кокса в слое шлака образующимся FeO



Выполнив расчеты объема выделяющегося газа CO₂ при разложении 1 кг мела, получили следующие результаты: для замены 1 кг кокса потребуется 8,3 кг мела, а для замены 1 кг извести – 1,7 кг мела. По существующей в ЭСПЦ-1 технологии для образования вспененного шлака присаживают в ванну около 5...6 кг мела на 1 т кокса и 50...60 кг на 1 т извести, при этом значительная часть углерода кокса окисляется кислородом атмосферы печи и не участвует во вспенивании шлака. При использовании предлагаемой технологии аналогичного газовыделения в шлаке можно достичь, сократив расход углеродосодержащего материала (кокса) на 50%; образующийся при разложении мела CaO компенсирует дефицитную известь, а приход теплоты от дожигаания образующегося CO – падение температуры ванны. Реакции разложение мела и окисления углерода металла образующимся FeO сопровождаются выделением газов, что способствует интенсивному вспениванию шлака. Некоторое снижение температуры шлака в районе ввода мела способствует образованию гетерогенной структуры, оптимальной для вспенивания.

Проведение исследовательских работ в области использования технологии вспенивания шлака показало, что максимальный объем пены образуется при температурах 1450...1550 °С; при более низких температурах шлак застывает, при более высоких снижается его способность удерживать газ, вследствие чего объем шлака уменьшается. Для снижения тепловых потерь сталеплавильным агрегатом в дальнейшем представляется перспективным направлением использование смеси, состоящей из мела и углеродосодержащего материала (кокса).

Опыт показывает, что для обеспечения эффективного контроля за расходом мела и высоты вспененного шлака необходимо дуть мел на границу металл – шлак малыми порциями (по 10...20 кг), постоянно контролируя высоту вспененного шлака, и в случае избытка шлака принимать меры для его скачивания. Инжекцию мела предлагается проводить в потоке O₂ и Ar. Поток O₂ на начальном этапе ведения плавки позволит проводить подрезку и расплавление металлошихты, а также будет способствовать окислению элементов металлошихты, что

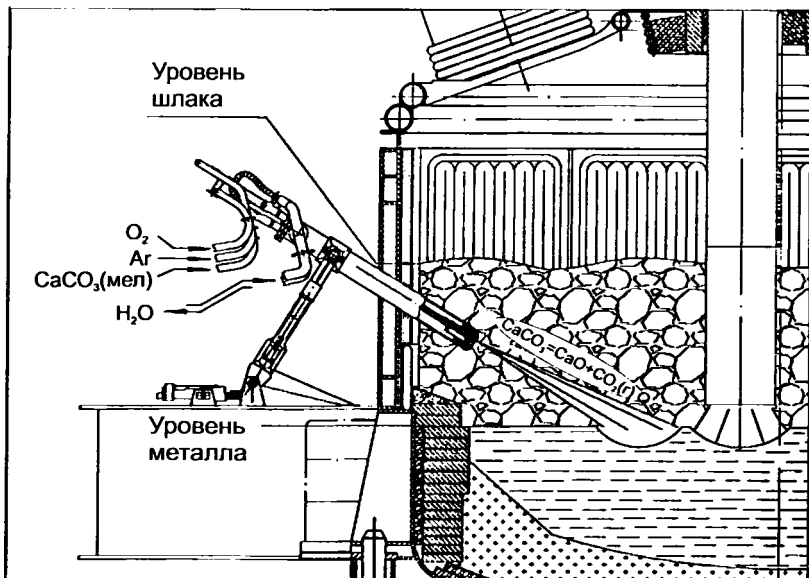


Рис. 3. Технологическая схема работы ДСП-100 на вспененных шлаках с использованием порошкообразного мела

обеспечит интенсификацию процесса плавления металла в ДСП. В дальнейшем по мере уменьшения содержания углерода в расплаве и необходимости снижения уровня переокисленности металла поток O_2 рекомендуется заменить на Ar в завершающей стадии доводки плавки.

Технологическая схема работы печи на вспененных шлаках показана на рис. 3 и 4.

Очевидным преимуществом использования данной технологии является то, что электрические дуги, погруженные во вспененный шлак, горят стабильнее, уменьшаются колебания силы тока и напряжения. Это позволяет повысить вводимую в печь мощность примерно на 15%. При уменьшении токового времени и общей продолжительности плавки уменьшится и удельный расход электроэнергии. В результате увеличения длины дуг и снижения силы тока дуги, а также меньшего бокового расхода электрода при экранировании дуг шлаком расход электродов снизится на 10...15%.

В конечном счете использование технологии вспенивания шлака на основе инъекционных методов ведения плавки в ДСП с применением альтернативного материала – мела предполагает получение результатов, показанных в табл. 2.

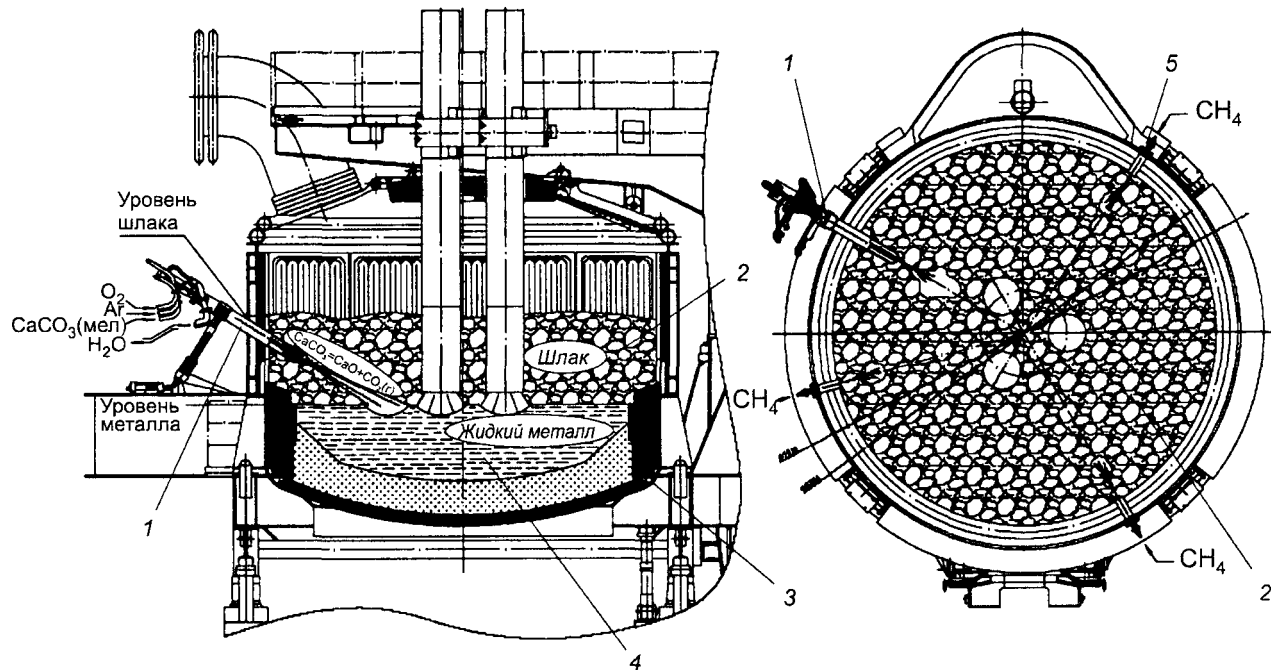


Рис. 4. Технологическая схема работы ДСП-2 на вспененных шлаках:
 1 – стенная фурма-манипулятор; 2 – пенный шлак; 3 – ДСП; 4 – жидкий металл; 5 – ТКГ

**Сравнительные технико-экономические показатели ведения плавки
с применением предлагаемой и базовой технологий вспенивания шлака**

Технология ведения плавки в ДСП	Расход электроэнергии, кВт·ч/т	Расход кислорода (ТКГ + копье/ТКГ + копье + фурма), м ³ /т	Расход кокса, кг/т	Расход извести, кг/т	Расход мела, кг/т	Расход электродов, кг/т
Базовая	450... 60	30,0... 35,0	4,0... 5,0	50,0... 55,0	-	2,6... 2,8
Предлагаемая	410... 420	40,0... 42,0	2,0... 2,5	15,0... 20,0	40,0... 60,0	2,25... 2,55

Эффективное применение технологии вспенивания шлака с использованием мела, несомненно, приведет к образованию большего объема шлака, чем скачивается из ДСП-100 при существующей технологии. Проблему можно решить, применив современный способ скачивания шлака, исключающий использование шлаковых чаш. Шлак предлагается скачивать через порог рабочего окна под печь, в шлакоуборочный тоннель на специально организованную подстилку, откуда его можно убирать и вывозить еще в горячем состоянии с помощью ковшевого погрузчика на каждой плавке в накопительные закрома для охлаждения и дальнейшей переработки в песчано-щебеночную смесь, используемую в дорожном строительстве.

Перспективным направлением применения инъекционных технологий для сверхмощной ДСП-100 РУП «БМЗ» является использование порошкообразного мела для ввода в зону горения электрических дуг с целью интенсификации вспенивания шлака. Работа электродуговой печи на вспененном шлаке позволит повысить коэффициент теплопередачи излучения электрических дуг с 36 до 50...90%, снизить тепловую нагрузку на футеровку печи, расход электродов и потребление электроэнергии, уменьшить время плавки под током.

В целом такая технология способна улучшить технико-экономические показатели плавки. Экономия электроэнергии при выплавке стали под вспененным шлаком достигнет 15...35 кВт·ч на 1 т жидкой стали, что позволит выйти для условий РУП «БМЗ» на удельный расход электроэнергии 410...420 кВт·ч/т.

ЛИТЕРАТУРА

1. Явойский, В.И. Теория процессов производства стали / В. И. Явойский. М.: Металлургия, 1967. 751 с.
2. Андрианов, Н.В. К вопросу об устойчивости шлаковых пен в сталеплавильной ванне / Н.В. Андрианов, А.А. Чичко // Литье и металлургия. 2005. № 1. С. 18 – 25.

3. *Соболев, В.Ф.* Статистический факторный анализ характеристик шлаков сталеплавильного производства / В.Ф. Соболев, Н.В. Андрианов, А.А. Чичко // *Литье и металлургия.* 2005. № 2. С. 113 – 115.

4. *Лопухов, Г.А.* Применение кислорода в дуговых сталеплавильных печах / Г.А. Лопухов // *Электрометаллургия.* 2005. № 3. С. 2 – 27.

УДК 669.046:536.12:518.61

В.И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (НАН Беларуси),
Ю.А. САМОЙЛОВИЧ, д-р техн. наук (НПП «Платан»),
Н.Л. МАНДЕЛЬ, канд. техн. наук, **П.В. САВАНЬ** (БНТУ)

ТЕПЛОВЫЙ РЕЖИМ ШАГАЮЩИХ БАЛОК В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ СОВРЕМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ

В металлургической промышленности нагревательные печи с шагающими балками осваиваются сравнительно недавно, в связи с чем раскрытие многих закономерностей, связанных со спецификой конструкции и тепловой работы печей нового типа, представляет большой интерес [1, 2]. Специфика нагрева заготовок в печах с шагающими балками в значительной степени определяется режимом шагания, что приводит к периодической смене условий теплообмена у нижней поверхности заготовок, перемещаемых вдоль печи. Указанная периодичность приводит к возникновению колебаний температуры нижней поверхности заготовок, что в ряде случаев, особенно при холодном посаде заготовок из сталей с низкими пластическими свойствами, может приводить к нарушению сплошности нагреваемого металла.

Решение задачи оптимального выбора режимов нагрева должно базироваться на учете теплового режима шагающих балок, который, в свою очередь, определяет температурное поле заготовок. Ниже изложены результаты анализа особенностей теплового режима шагающих балок на примере нагревательной печи стана 850 РУП «Белорусский металлургический завод». Техническая характеристика печи стана 850 приведена в работах [1, 2].

Немаловажную роль в повышении качества нагрева металла в исследуемых печах играет использование рейтеров – специальных насадок из жаропрочной стали, которые прикрепляются к подовым трубам и служат опорой для перемещаемых вдоль печи заготовок. В работах [3, 4] отмечено, что использование рейтеров позволяет повысить производительность печей на 8...10%, уменьшить расход топлива на 8...10%, снизить угар металла на 0,15...0,20%, а также существенно снизить перепад