УДК 669.162:669.046.516

А.Ф. Шевченко[1], *И.А. Маначин*[1], *А.П. Толстопят*[2], *С.А. Шевченко*[1]

[1] Институт черной металлургии Национальный академии Украины
[2] Днепропетровский национальный университет

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИНЖЕКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЧУГУНА ВДУВАНИЕМ МАГНИЯ ЧЕРЕЗ МНОГОСОПЛОВУЮ ФУРМУ

Аннотация. Изучены особенности формирования прифурменой и массообменной зон при инжекционной десульфурации чугуна в ковшах при использовании двухсопловых фурм. Эксперименты выполнены на холодной прозрачной модели (1:10) ковша. Варьировали конструкцией фурм, диаметром каналов, углом отклонения сопел, расходом и скоростью газа. Определяли параметры прифурменой зоны, глубину внедрения потока, величину условной поверхности массообменной зоны, параметры колебаний ванны и др. Выработаны рациональные параметры вдувания магния для обеспечения более эффективного усвоения его чугуном.

Ключевые слова: десульфурация, ковш, ванна, фурма, массообменная зона, колебания ванны.

REGULARITIES OF INJECTION PROCESSING OF HOT METAL BY MAGNESIUM INJECTION LANCE WITH A LOT OF NOZZLES

Abstract. The aim work is to study peculiarities of formation and mass transfer out of lance zones during injection desulphurization in ladles using two-nozzles lances. The experiments were performed on a cold transparent model (1:10) of landle. Varied design lance diameter of channel, angle of deviation nozzles, flow and velocity of the gas. Determined parameters out of lance zone penetration depth flow of conditioned mass transfer surface area, motion parameters baths, etc. worked out rational parameters of magnesium injection for more efficient assimilation of its iron.

Keywords: desulfurization, ladle, bathtub, lance, mass transfer zone, fluctuations bath.

Технологические и технические наработки по ковшевому рафинированию жидкого чугуна реагентами на основе диспергированного магния включают процессы вдувания как «чистого» (без разубоживающих добавок) зернистого магния [1 – 3], так и магния в смеси, например, с известью [1, 3, 4]. Промышленное применение этих технологий свидетельствует о том, что вдувание зернистого (в т.ч. гранулированного) магния без добавок технико-экономически наиболее выгодно [1 – 5]. Кроме этого при вдувании зернистого магния двухфазный поток по ряду параметров приближается к газовому потоку [5], чем создаются благоприятные предпосылки для его деления на несколько потоков и более рассредоточенному вводу реагента в жидкий расплав, создавая при этом более выгодные условия для протекания тепло- и массообменных процессов рафинирования чугуна.

Одним из технологических решений более рассредоточенного ввода магния в жидкий чугун является вдувание его не через одно сопло, а через несколько, например, через два сопла. При вдувании порошковой смеси магния с известью американская фирма ESM решила эту задачу на металлургическом комбинате «Северсталь» [6, 7] вдуванием смеси через две независимые, но одновременно погружаемые фурмы, чем обеспечила практически вдвое увеличение интенсивности ввода магния в расплав чугуна, вплоть до 22 кг/мин, и соответственно вдвое сократив продолжительность операции вдувания магния. Негативной стороной приведенного технологического решения является то, что для обработки одного ковша применяются две инжекционные системы подготовки и вдувания реагентов, что не всегда возможно в реализации, а также значительно увеличивает капитальные и эксплуатационные затраты.

Институтом черной металлургии задача повышения интенсивности ввода магния в ковш с жидким чугуном решается другим методом – применяется одна инжекционная система, но обеспечивающая повышение магнийпоглощающего потенциала системы рафинирования. Это достигается за счет диспергирования вдуваемого магния [8] как перед непосредственным вводом двухфазного потока в расплав, так и в прифурменой зоне.

Одним из элементов этой технологической схемы является погружаемая многосопловая (например двухсопловая) фурма, которая содержит в своей конструкции делитель холодного двухфазного потока (в оголовке фурмы) и два сопла для рассредоточенного вдувания магния в расплав. Для обеспечения условий наилучшего рассредоточения двухфазного потока в ванне [1, 5] сопла на выходе отклонены от оси вертикального канала фурмы. Из приведенного выше видно, что новая инжекционная система вдувания магния имеет существенные отличия от ранее применявшихся.

Новые требования к процессу внепечной обработки чугуна обусловливают необходимость изучения влияния параметров и условий вдувания магния на формирование тепло- и массообменной зоны в рафинируемой ванне при использовании многосопловых фурм, а также изысканию наиболее рациональных технологических решений ввода магния в расплав чугуна.

Исследования выполнены при комплексе экспериментов на «холодной» прозрачной модели установки ДНУ–ИЧМ (с масштабированием 1:10) [9 – 12] с применением отработанного и проверенного метода [5, 9, 10, 12] замера условного газосодержания ванны и условной межфазной поверхности, образующейся в продуваемой ванне. Указанная методика была усовершенствована с обеспечением замера не только поверхности массообмена, но и глубины внедрения потока в ванну, амплитуды колебаний поверхности ванны и высоты всплесков.

Для съемки процесса продувки ванны (вода) в прозрачной модели ковша была применена цифровая видеокамера Sanyo VPC–HD1000 с частотой съемки 60 кадров/с и выдержкой до 1/10 000. Камера позволяла получать цифровое видеоизображение с разрешением 1920×1080. Длительность съемки эксперимента составляла 10 с, а объем получаемой информации – 600 кадров.

Двухсопловые фурмы, исследованные на моделях, имели различные конструктивные параметры, но все включали вертикальный канал, который на окончании делился на два канала (сопла), из которых происходило истечение потока в ванну. Исследованы фурмы с диаметром каналов на выходе 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8 и 2 мм с отклонением оси сопел на выходе от вертикальной оси (α) 15, 22, 30 и 45°. Расход инжектирующего воздуха изменяли в пределах 0,48 – 2,2 нм^3/ч, скорость потока – от 44 до 330 м/с.

При проведении экспериментов установлено, что истекающие из каналов фурм потоки внедряются в ванну и образуют газовые полости, вытянутые вдоль оси истечения. Глубина внедрения струй в жидкость ($L_{стр}$) увеличивается с увеличением скорости потока ($W_п$), диаметра сопла на выход ($D_к$) и в общем виде с увеличением расхода вдуваемого газа ($V_г$). В исследованном диапазоне скоростей ($W_п$ = 44 – 330 м/с) и диаметров канала ($D_к$ = 1,4 – 2,0 мм) средняя глубина внедрения струи в жидкость увеличивается с 19,5 – 23,1 до 56,0 – 65,4 мм (при увеличении скорости и диаметра сопла).

При экспериментальных продувках выявлено также, что глубина вдувания струи ($L_{стр}$) не является постоянной величиной (при сохранении постоянными параметров вдувания), а изменяется от средних значений $\left(L_{стр}^{сред}\right)$ до максимальных $\left(L_{стр}^{макс}\right)$ с разницей 6,5 – 30,0 мм (26 – 68 % от средних значений). Это явление отмечено в каждом эксперименте, т.е. происходит как бы вибрация струи в продольном направлении, что может быть обусловлено процессами пузыреобразования в жидкости, отделением пузырей от газовой полости и последующим всплыванием отделившихся пузырей.

По известному выражению [13] для параметров выполненных экспериментов были рассчитаны величины глубины внедрения струи воздуха в воду. Сопоставление расчетных и экспериментальных фактических величин глубины внедрения струй воздуха в ванну (воды) указывают на их отличие (рис. 1). Значение расчетной глубины $\left(L_{стр}^{расч}\right)$ больше чем экспериментальное $\left(L_{стр}^{эксп}\right)$ и эта разница увеличивается с возрастанием скорости потока, сечения сопла и расхода газа.

Если выразить отношение $L_{стр}^{экс} / L_{стр}^{расч}$ через корректирующий коэффициент $K_к$, то на основании массивов экспериментальных и расчетных данных получена зависимость $K_к$ от скорости потока $W_г$ в виде функции:

$$L_{стр}^{экс} / L_{стр}^{расч} = K_к = 3,4408\, W_п^{-0,339}. \qquad (1)$$

С учетом корректирующего коэффициента $K_к$ фактическая глубина внедрения потока в жидкую ванну (в условиях вдувания зернистого магния) может быть рассчитана по уточненному [13] выражению:

$$L_{стр}^{ф} = K_к \sqrt{\frac{\rho_г}{\rho_ж g}} W_п \sqrt{D_к}, \qquad (2)$$

где $\rho_г$, $\rho_ж$ – плотность газа и жидкости, соответственно; $W_п$ – скорость потока, истекающего из канала погружаемой фурмы; $D_к$ – диаметр канала фурмы на выходе, а величина $K_к$ рассчитывается по выражению (1) (по величине фактической скорости потока в исследуемом сечении).

Результаты экспериментальных продувок на модели с двухсопловыми фурмами различного типоразмера и широкими пределами варьирования параметров показали, что величина угла α – отклонения сопел (на выходе) от вертикальной оси практически не влияет на глубину внедрения струи в жидкую ванну.

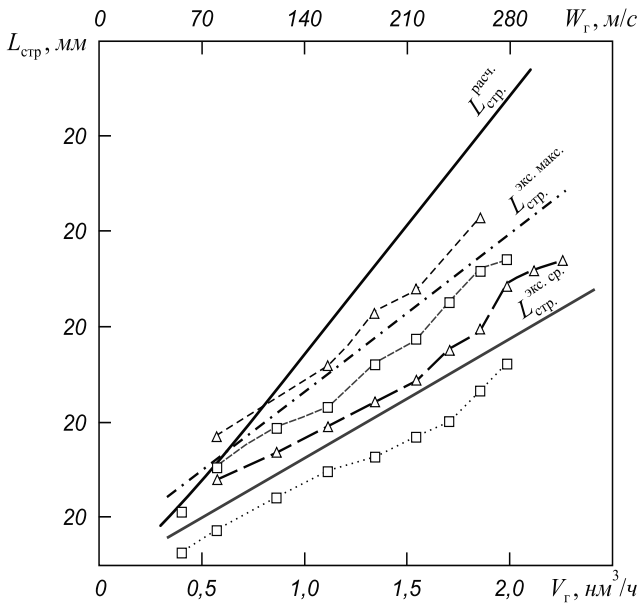

Рис. 1. Изменение расчетных $\left(L_{стр}^{расч}\right)$, экспериментальных средних $\left(L_{стр}^{экс.ср}\right)$ и максимальных $\left(L_{стр}^{экс.макс}\right)$ значений глубины внедрения струи воздуха в жидкость (вода) при различных расходах газа ($V_г$) и скорости потока ($W_г$), $D_к$ = 1,6 мм

При инжекционной ковшевой обработке чугуна за счет вдуваемых рафинирующих двухфазных потоков в объеме ванны образуется активная газосодержащая зона [1, 5], поверхность которой можно оценить по величине условной поверхности $П_г$ [1, 5, 12], замеряемой по кинограммам при холодном моделировании процесса рафинирования чугуна [5, 9, 10]. Экспериментальная оценка закономерностей изменения $П_г$ была выполнена на холодной прозрачной модели с применением односопловых и двухсопловых фурм (в равных условиях вдувания). Результаты свидетельствуют о том, что в обоих случаях величина образующейся межфазной (условной) поверхности $П_г$ возрастает с увеличением расхода вдуваемого газа (рис. 2). Кроме этого видим, что при одинаковых параметрах вдувания величина условной поверхности на двухсопловой фурме больше, чем на односопловой на 30 – 45 % (отн.), при этом абсолютная разница $П_г$ возрастает с 15 до 52 1/м при увеличении расхода газа-носителя с 0,5 – 0,6 до 1,3 – 1,4 нм^3/ч (см. рис. 2). Следовательно фактически установленная более развитая тепло-массообменная зона при вдувании реагентов через двухсопловую фурму предопределяет более благоприятные условия для усвоения магния чугуном, что соответственно должно сопровождаться повышением степени усвоения магния, успокоения процесса обработки чугуна в ковше и, как следствие, возможности повышения интенсивности ввода магния в расплав чугуна.

Фактические данные экспериментов на холодной модели показали, что при вдувании через двухсопловую фурму (также как и при односопловой фурме [1, 5]) величина угла а влияет на величину межфазной поверхности $П_г$, образующейся в ванне (рис. 3). Наибольшее значение межфазной поверхности при вдувании двухфазных потоков в расплав обеспечивается при отклонении сопел от вертикальной оси (угол α) 45° или угле β – между осями двухсопловой фурмы 90°.

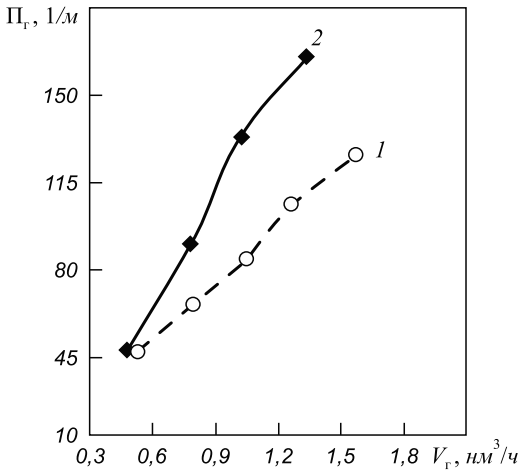

Рис. 2. Изменение условной межфазной поверхности ($П_г$), образующейся в ванне при холодном моделировании и различном расходе вдуваемого воздуха через односопловую (*1*) и двухсопловую (*2*) фурмы с одинаковыми сечениями каналов, α = 45°

Одной из основных задач, которую должен решить процесс вдувания магния через многосопловую (в частности двухсопловую) фурму, является успокоение и снижение активности барботирования ванны в ковше. Поэтому в объем экспериментов на прозрачной модели входили исследования закономерностей колебаний поверхности ванны при варьировании параметров вдувания. Анализ фактических данных и картограмм экспериментов при продувке двухсопловой погружаемой фурмой показал, что при использовании различных типоразмеров двухсопловых фурм барботирование ванны и ее поверхности (в отличие от односопловой фурмы) происходит с различных сторон от фурмы и более равномерно.

Высота всплесков и волн на поверхности ванны не является постоянной величиной, а изменяется в достаточно широких пределах – от 12 до 120 мм. Средние значения высоты всплеска (или волны) изменяются в пределах в среднем от 16 до 26 мм, а максимальные значения высоты всплеска – в пределах в среднем от 30 до 80 мм.

В условиях проведенных экспериментов увеличение расхода газа с 0,48 до 2,3 нм^3/ч сопровождается увеличением как высоты среднего всплеска $\left(h_{всп л}^{сред}\right)$, так и высоты максимальных всплесков $\left(h_{всп л}^{макс}\right)$, $h_{всп л}^{сред}$ увеличивается с 12 до 20 мм, а $h_{всп л}^{макс}$ – с 20 до 70 мм (рис. 4).

Аналогичные диаграммы (но при других значениях $h_{всп л}^{макс}$ и $h_{всп л}^{сред}$) получены при продувках с различными значениями $D_к$ и α через двухсопловые погружаемее фурмы. При анализе этого массива экспериментов было установлено, что особо возрастает активность барботирования ванны при расходах вдуваемого газа более 1,1 – 1,2 нм^3/ч, что сопровождается относительно небольшим

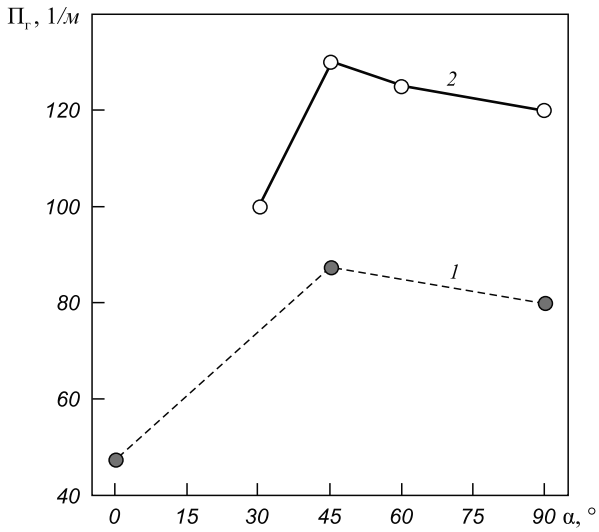

Рис. 3. Изменение условной межфазной поверхности ($П_г$) при холодном моделировании с вдуванием воздуха через погружаемые фурмы с различными углами отклонения сопел α от вертикальной оси, $V_г$ = 1,3 нм^3/ч:
1 – при вдувании одноканальной фурмой; *2* – при вдувании двухканальной фурмой

повышением $h_{всп}^{сред}$ и существенным увеличением $h_{всп}^{макс}$. Так, если при $V_г$ = 0,5 – 1,1 нм^3/ч средняя высота максимального всплеска составляет 30 мм, то при увеличении расхода газа до $V_г$ = 1,2 – 2,1 нм^3/ч максимальная высота всплеска возрастает в среднем до 55 мм (см. рис. 4), т.е. увеличивается в 1,8 раза. В то же время средняя высота всплесков возрастает с 12 – 16 до 16 – 20 мм, т.е. всего на 4 мм. В силу изложенного авторами сделан вывод о том, что основным фактором, обусловливающим большие всплески и даже выплески жидкости из ковша, являются величины максимальных всплесков, которые особенно возросли при расходах газа выше 1,2 нм^3/ч. Это же наблюдалось и при других диаметрах канала сопел и углах их отклонений от вертикальной оси. Наиболее спокойное и равномерное барботирование ванны в ковше обеспечивается при расходах вдуваемого газа $V_г$ < 1,1 – 1,2 нм^3/ч и при угле отклонения сопел двухсопловой фурмы от вертикальной оси 45°.

При изучении закономерностей поведения поверхности продуваемой в модели ковша ванны установлено также, что при расходах газа 0,45 – 2,3 нм^3/ч амплитуда колебаний находится в пределах 6 – 22 мм, увеличиваясь монотонно при повышении расхода газа. При рекомендованном режиме продувки с расходом $V_г$ < 1,1 – 1,2 нм^3/ч амплитуда колебаний не превышает, как правило, 15 мм.

Выводы. Выполненными на холодной прозрачной модели экспериментальными исследованиями закономерностей инжекционного рафинирования чугуна в ковшах установлено следующее.

- Глубина внедрения потока, истекающего из канала погружной фурмы, увеличивается с повышением скорости потока, расходного сечения канала и в общем виде с увеличением расхода газа. Величина глубины внедрения не является постоянной величиной (при постоянных параметрах вдувания), а изменяется от средних значений до максимальных на 26 – 68 % (в зависимости от скорости потока). Фактическая глубина внедрения потока меньше, чем расчетная (по известным выражениям), а поэтому в расчетное выражение введен поправочный коэффициент, зависящий от абсолютной величины скорости истекающего потока. Не установлено влияния угла наклона сопла (к вертикали) на глубину внедрения потока в жидкую ванну.
- При вдувании через двухсопловую фурму образующаяся в ванне поверхность массообменной зоны на 30 – 45 % больше, чем при односопловой фурме, что предопределяет более благоприятные условия усвоения, например магния при вдувании через двухсопловую (или многосопловую) фурму. Величина угла наклона сопел на многосопловой фурме влияет на величину образующейся в ванне межфазной поверхности. Наиболее высокие значения поверхности получены при угле отклонения сопел от вертикальной оси на 45°.
- Применение многосопловых (в частности, двухсопловых) фурм для вдувания магния снижает интенсивность барботирования ванны в ковше (при равных условиях вдувания). Интенсивность барботирования ванны определяется не средней величиной высоты волны (или всплеска), а максимальной высотой, которая в 2 – 4 раза больше, чем средняя высота. При увеличении (на модели) расхода вдуваемого газа в пределах 0,48 – 2,3 нм^3/ч (что соответствует расходу на реальном ковше 48 – 230 нм^3/ч) средняя высота всплеска возрастает с 12 до 20 мм, а максимальная высота – до 70 мм. Наиболее спокойное и равномерное барботирование ванны обеспечивается при $V_г$ < 1,1 – 1,2 нм^3/ч (< 110 – 120 нм^3/ч для реальных условий) и угле отклонения сопел двухсопловой фурмы от вертикальной оси 45°.
- Экспериментально установленное более эффективное диспергирование рафинирующего потока и образование более развитой массообменной поверхности в ванне при вдувании через двухсопловую фурму предопределяют более эффективное усвоение, например магния, и возможность интенсификации его ввода в расплав.

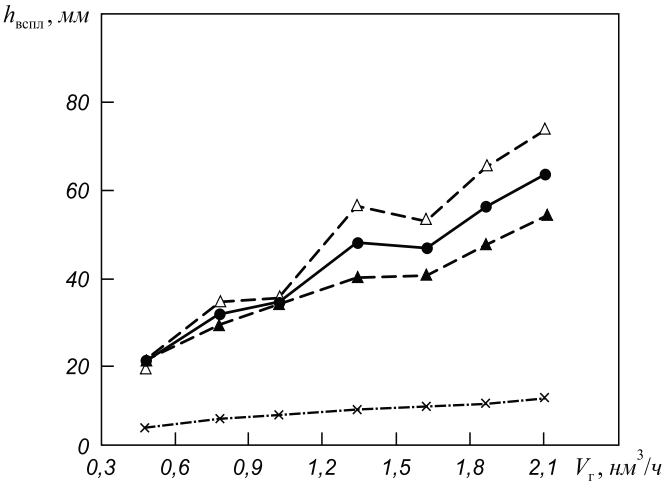

Рис. 4. Изменение средних $\left(h_{всп}^{сред}\right)$ и максимальных $\left(h_{всп}^{макс}\right)$ величин высоты всплесков в ковше при различных расходах воздуха ($V_г$), вдуваемого двухсопловой фурмой, $D_к$ = 1 мм; α = 45°:
△ – высота максимального всплеска со стороны левого сопла;
▲ – высота максимального всплеска со стороны правого сопла;
× – высота среднего всплеска в ковше;
—— – усредненное значение $h_{всп}^{макс}$;
—●— – усредненное значение $h_{всп}^{сред}$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. – Киев: Наукова думка, 2011. – 207 с.
2. Большаков В.И., Шевченко А.Ф., Лю Дун Ие и др. // Сталь. 2009. № 4. С. 13 – 20.

3. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием. – М.: Металлургия, 1980. – 239 с.
4. Зборщик А.М., Куберский С.В., Акулов В.В., Довгалюк Г.Я. // Сталь. 2010. № 1. С. 157 – 160.
5. Шевченко С.А. Разработка научных положений и технологии инжекционного процесса десульфурации чугуна диспергированным магнием в большегрузных ковшах: Дис. … канд. техн наук. – Днепропетровск, 2010. – 217 с.
6. Степанов А.А., Ламухин А.М., Зинченко С.Д. и др. Освоение технологии производства сталей с использованием установки десульфурации чугуна в условиях конвертерного производства ОАО «Северсталь»: Тр. VIII Междунар. симпозиума по десульфурации чугуна и стали. – Нижний Тагил. 2004. С. 83 – 87.
7. Ламухин А.М., Зинченко С.Д., Ордин В.Г. и др. Перспективы десульфурации чугуна на ОАО «Северсталь» с использованием реагентов на основе магния: Тр. VII Междунар. симпозиума по десульфурации чугуна и стали. – Аниф, Австрия. 2002. С. 66 – 70.
8. Маначин И.А., Шевченко А.Ф. Оценка влияния диспергирования вдуваемого магнийсодержащего потока на магнийпоглощающий потенциал прифурменной зоны // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ. –К.: Наукова думка, 2010. Вып. 21. С. 128 – 132.
9. Толстопят А.П., Флер А.А., Рузова Т.А., и др. Моделирование заглубленной продувки чугуновозного ковша. Параметры газораспределения // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ. –К.: Наукова думка, 2008. Вып. 17. С. 97 – 100.
10. Рузова Т.А., Толстопят А.П., Шевченко А.Ф. // Науковий вісник НГУ. Енергетика та автоматизація виробничих процесів. 2007. № 12. С. 91 – 99.
11. Толстопят А.П., Флер Л.А., Давидсон В.В. и др. Экспериментальное определение скорости частиц в канале постоянного диаметра // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ. –К.: Наукова думка, 2011. Вып. 23. С. 113 – 122.
12. Маначин И.А., Толстопят А.П., Шевченко А.Ф., Рузова Т.А. Влияние параметров вдувания на прифурменную зону при инжекционном рафинировании чугуна магнием // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. тр. ИЧМ. –К.: Наукова думка, 2011. Вып. 24. С. 107 – 112.
13. Явойский В.И., Дорофеев Г.А., Повх И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 496 с.

© 2013 г. *А.Ф. Шевченко, И.А. Маначин, А.П. Толстопят, С.А. Шевченко*
Поступила 9 апреля 2013 г.

УДК 621.774.34: 621.789

Г.М. Дружинин[1], Ю.А. Самойлович[2], Е.В. Попов[2]

[1] Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники
[2] Уральский федеральный университет

СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МАССИВНЫХ СТАЛЬНЫХ СЛЯБОВ ПРИ НАГРЕВЕ В МЕТОДИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Аннотация. Изложена расчетная методика выбора рациональных конструктивных параметров разводки опорных труб, изучено влияние использования разводки продольных глиссажных труб методических печей на динамику исчезновения темного пятна.

Ключевые слова: опорная труба, математическая модель, толкательная печь, термическая неоднородность, разводка труб.

WAYS TO REDUCE THE THERMAL HETEROGENEITY OF MASSIVE STEEL SLABS BY HEATING IN THROUGH THE HEATING FURNACES

Abstract. In work the settlement technique of a choice of rational design data of distributing of basic pipes is stated, influence of use of distributing of longitudinal glissazhny pipes of methodical furnaces on dynamics of disappearance of a dark stain is studied.

Keywords: abutment pipe, mathematical model, pusher furnace, thermal heterogeneity, shift of pipes.

При движении металла в методической печи, имеющей зону нижнего нагрева, экранирование нижней поверхности заготовок подовыми устройствами (глиссажными трубами, рейтерами) приводит к образованию на заготовках зон с пониженной температурой – так называемых «темных пятен». Возникающая при этом термическая неоднородность поля температур заготовки приводит к перегрузке валков прокатного стана и возникновению дефектов получаемого проката. На основании многочисленных экспериментов установлено, что для мало- и среднеуглеродистых сталей допустимые значения параметра ΔT не должны превышать 50 – 60 °С. В противном случае возникает вероятность образования дефектов стального проката.

В качестве меры термической неоднородности заготовок принято использовать понятие «разности температур», представляющей собой перепад температур в зоне контакта нижней поверхности заготовки с глиссажными трубами и в плоскости, расположенной между соседними глиссажными трубами.