

УДК 669.17.046. 517В: 536

**В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов*, В.Ф.Поляков, И.В.Крикент*,
С.В.Греков, В.А.Буршитин**

**ОСОБЕННОСТИ МАССОПЕРЕНОСА В ВАННЕ
ЁМКОСТЬЮ 140т УСТАНОВКИ КОВШ–ПЕЧЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

*Институт черной металлургии НАН Украины,
Днепродзержинский государственный технический университет**

Целью работы являлось исследование гидродинамики расплава в установке ковш–печь (УКП). Численным моделированием выявлены особенности массопереноса в ванне ёмкостью 140т при обработке расплава на установке ковш–печь постоянного тока. Подтверждено преобладающее влияние интенсивности продувки ванны аргоном, а также влияние мощности электродугового нагрева и конструктивно–компоновочного расположения донного продувочного блока на особенности массопереноса в ковше. Определены рациональные параметры продувки при нагреве расплава на оборудовании такого типа.

установка ковш–печь, моделирование, массоперенос, параметры продувки

Введение. Несмотря на значительное число публикаций о гидродинамике расплава в ковшовой ванне при обработке на установке ковш–печь (УКП), вопросы влияния собственных электрического и магнитных полей, образующихся при протекании через расплав электрического тока, остаются недостаточно изученными.

Актуальность исследований в этом направлении обоснована также наличием информации об использовании в металлургической практике в качестве энергоносителя наряду с переменным и постоянным током [1,2], а эффективность массопереноса расплава, как установлено [3], зависит не только от интенсивности его продувки, но и от подводимой к ванне мощности электродугового нагрева. Кроме того, установленные особенности массопереноса расплава в ковше ёмкостью 140т на УКП постоянного тока, требуют дополнительного изучения влияния конструктивно–компоновочного расположения донного продувочного блока фурм, анализа и обсуждения рассмотренных факторов влияния на гидродинамическое состояние ванны.

Метод и объект исследований. Исследования проводили численным методом аналогично [3]. В качестве объекта исследований использовали данные для УКП–140 постоянного тока [4]. Моделирование осуществляли с учётом параметров тепловых стоков и др. данных применительно к ковшу такой ёмкости и геометрии. Возникающие в расплаве электромагнитные силы (э.м.с.) оценивали по их объёмной плотности, плотности электрического тока в ванне, напряжённости электрического и магнит-

ного полей, магнитной проницаемости и электрической проводимости металлического расплава, ряду других параметров.

С целью оценки влияния перечисленных факторов, полученные результаты сопоставляли с принятым вариантом (масса металла в ковше – 140т; отношение высоты металла в ковше (H_m) к диаметру его днища ($D_{\text{дн}}$) – 0,94; фактические значения $R\phi$ и $\angle\phi$ для УКП–140 переменного тока ПАО «ЕМЗ».

В соответствие с разработанным авторами порядком оценки данных, результаты исследований анализировали по полям скорости в разных сечениях ванны, по изменению величины составляющих (вертикальная, радиальная и тангенциальная) и результирующей скорости потоков в объеме, по глубине ванны и по оси отверстия для ввода кусковых (K) добавок, по контурным диаграммам распределения усреднённых по высоте ванны значений вертикальной составляющей скорости потоков ($V_{\text{вер}}$), по продолжительности усреднения расплавленной в центре поверхности ванны легкоплавкой добавки–индикатора ($\tau_{\text{уср}}$) и объёму застойных зон ($O33$) при изменении переменных факторов ($R\phi$, $\angle\phi$, P , Q).

Изучили более 300 вариантов с параметрами расположения продувочного блока на радиусах $R\phi = 0,4; 0,5; 0,6$ и $0,7 R_{\text{дн}}$ (где $R_{\text{дн}}$ – радиус днища ковша) с углами между фурмами $\angle\phi = 0,5; 1,0$ и $1,5\alpha$ (где α – принятое в исследованиях кратное значение угла) при изменяющемся расходе аргона в расширенных пределах значений Q от 0,04 до 1,0М (где М – принятый в исследованиях предельный расход аргона на ковш) и подводимой к ванне минимальной (9,6МВт) и максимальной (16,4МВт) мощности электродугового нагрева P .

Результаты исследований и их обсуждение. Вначале провели качественную оценку условий массопереноса расплава в ванне по полям скорости и контурным диаграммам. Установлено, что, наряду с Q и P , изменение конструктивно–компоновочного расположения продувочного блока фурм в днище сталеразливочного ковша рассмотренной ёмкости и геометрии оказывает влияние на характер массопереноса продуваемой ванны в процессе нагрева расплава на УКП постоянного тока. Анализ гидродинамики по полям скорости ванны без и с воздействием э.м.с. при мощности нагрева $P = 16,4\text{МВт}$ (рис.1) и полям скорости других рассмотренных вариантов (здесь не представлены) показал, что в нижней осевой части ванны с подводом P возникает и ростом её величины увеличивается зона несолоноидального массопереноса, начиная с минимальных значений расхода и вплоть до значений $Q=0,24M$. Наибольшие размеры такая зона занимает при минимальных значениях Q и максимальных значениях P .

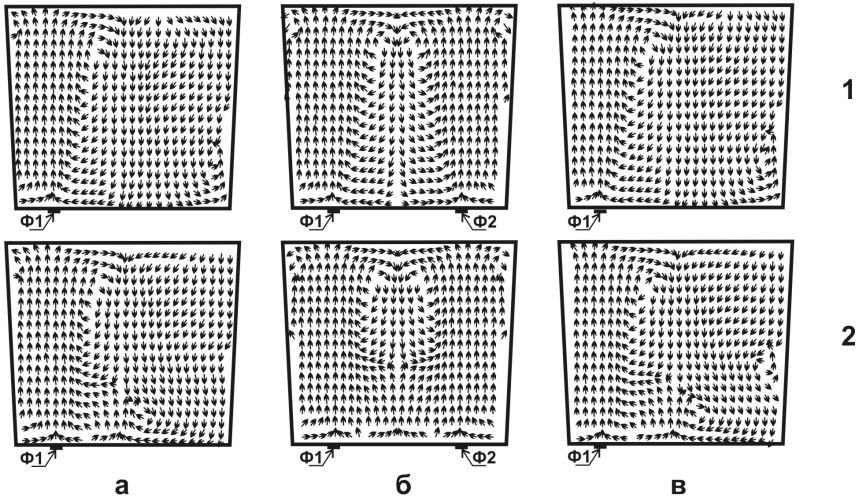


Рис. 1. Поля скорости расплава в вертикальных сечениях ванны, проходящих через ось симметрии ковша и фурму (ы), при продувке с интенсивностью $0,04M$ без (1) и с воздействием э.м.с. (2). Расположение продувочного блока на $R\phi = 0,6 R\delta n$ (а, б) и $0,7 R\delta n$ с $\angle\phi = 1,0\alpha$ (а, в) и $\angle\phi = 1,5\alpha$ (б).

На представленных выше полях скорости расплава показано влияние э.м.с. на изменение характера перемешивания. Установлено, что особенности массопереноса продуваемого аргоном расплава при нагреве электродугой постоянного тока определяются не только величиной подводимой электрической мощности и расходом аргона, но и расположением продувочного блока ($R\phi$ и $\angle\phi$). Определено также, что для расположения фурм при значениях $\angle\phi$ в пределах $0,5-1,0\alpha$ независимо от значения $R\phi$ при интенсивности продувки в пределах значений Q от $0,04$ до $0,24M$ под воздействием сформированных преобладающих объемов расплава, вовлеченных в соленоидальный массоперенос, возникающая в нижней осевой части ванны зона несоленоидального движения расплава под воздействием э.м.с. смещается от оси симметрии ковша в сторону продувочного блока фурм (рис. 1а и 1в). Увеличению объема расплава с несоленоидальным массопереносом, для указанных конструктивно-компоновочных параметров расположения продувочного блока и значений технологических параметров воздействия на расплав, способствует уменьшение $R\phi$ и Q и увеличение $\angle\phi$ и P . Иное расположение формируемой зоны несоленоидального массопереноса в ванне обеспечивается при значении $\angle\phi = 1,5\alpha$ (рис. 1б). При такой компоновке продувочного блока величина зоны несоленоидального массопереноса в меньшей степени сокращается с увеличением интенсивности продувки в вышеуказанных пределах и сохраняется

даже при повышенной (более $0,24M$) интенсивности продувки, в отличие от рассмотренных выше вариантов.

Анализом контурных диаграмм исследуемой ванны в квазистационарном состоянии массопереноса установлено следующее. Независимо от значений $R\phi$, режимов равномерной продувки и нагрева расплава (в рассмотренных пределах изменения перечисленных факторов) зоны восходящих потоков формируются над фурмами, а нисходящих в диаметральном противоположной от фурм зоне (для $\angle\phi=0,5\alpha$), между фурмами (для $\angle\phi=1,5\alpha$) или одновременно в двух указанных зонах (для $\angle\phi=1,0\alpha$). При минимальных значениях $R\phi$ и $\angle\phi=1,0\alpha$, независимо от режима нагрева и без э.м.с., для интенсивности продувки $Q=0,04M$ формирование нисходящих потоков начинается с образованием диаметрально противоположных зон, которые с увеличением Q объединяются в одну зону, локализуя внутри себя зону восходящих потоков. Увеличение $R\phi$ от $0,5R\delta n$ до $0,7R\delta n$ и интенсивности продувки (при $\angle\phi = \text{const}$), независимо от режима нагрева или без него, обеспечивает разделение общей зоны восходящего потока на два восходящих потока над фурмами и формирует объединённую зону нисходящих потоков (между фурмами и в диаметральном противоположном от них направлении). Форма такой зоны зависит от интенсивности продувки и значения $R\phi$, а занимаемая ею площадь возрастает с увеличением Q .

На примере контурных диаграмм некоторых из рассмотренных вариантов (рис.2) показаны характер распределения и величина потоков разной направленности в ванне с различным расположением ($R\phi$) продувочного блока при одинаковых минимальных значениях Q .

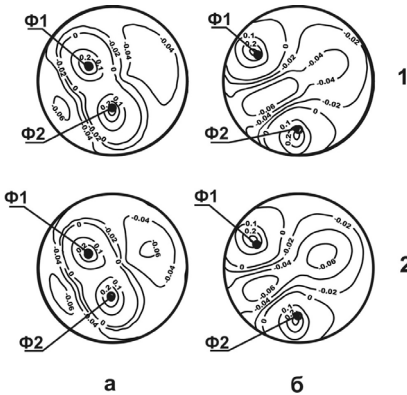


Рис.2. Контурные диаграммы распределения зон усреднённой по высоте ванны вертикальной составляющей скорости потоков расплава при равномерной продувке через две фурмы с расходом $Q=0,04M$. Расплава в состоянии перемешивания без э.м.с. (1) и с э.м.с. при мощности нагрева $P=16,4\text{МВт}$ (2). Расположение фурм на $R\phi = 0,4 R\delta n$ (а) и $R\phi = 0,7 R\delta n$ (б); угол между фурмами ($\angle\phi$) – практически используемый на УКП-140 переменного тока ПАО «ЕМЗ».

Количественную оценку результатов расчёта параметров массопереноса расплава в рассматриваемых условиях, на первом этапе, осуществляли по изменению $V_{\text{вер}}$ по глубине ванны без и с воздействием э.м.с. по

оси отверстия для ввода добавок и по изменению усреднённых максимальных значений этого параметра в зависимости от значения Q , величины P и расположения продувочного блока фурм ($R\phi$ и $\angle\phi$).

В данном исследовании, ввиду практически используемого в условиях нагрева ванны ввода только K добавок, ограничились рассмотрением изменений $V_{вер}$ по оси отверстия для их ввода. Исследованиями подтверждено превалирующее влияние Q на величину $V_{вер}$ во всех рассмотренных вариантах и определено влияние P , $R\phi$ и $\angle\phi$ на условия массопереноса расплава в ванне ковша такой ёмкости и геометрии.

Установлено, что, независимо от изменения всех (Q , P , $R\phi$ и $\angle\phi$) и каждого отдельного из указанных факторов, характер распределения значений $V_{вер}$ по оси отверстия для ввода K добавок, в целом, не изменяется и, для преобладающего числа случаев, имеет восходящую направленность. В то же время, следует отметить, что для отдельных вариантов компоновки продувочного блока ($R\phi = 0,6 R\phi_n$ при $\angle\phi=0,5\alpha$ и $\angle\phi=1,5\alpha$; $R\phi = 0,4 R\phi_n$ и $R\phi = 0,5 R\phi_n$ при $\angle\phi=1,0\alpha$) при минимальных значениях Q и только в придонной части ванны наблюдаются значения $V_{вер}$ нисходящей направленности. Проведённой сопоставительной оценкой значимости влияния переменных факторов на изменение $V_{вер}$ по оси ввода K добавок с использованием статистической обработки по критерию Уайта (при уровне его значимости 0,05) установлено следующее. Существенное изменение $V_{вер}$ при этом обеспечивается для $R\phi = 0,4 R\phi_n$ и $R\phi = 0,5 R\phi_n$ со значениями $\angle\phi=1,0\alpha$ во всех исследованных диапазонах расхода аргона Q и мощности нагрева P . В то же время, для указанных значений $R\phi$ со значением $\angle\phi=1,5\alpha$ существенное изменение величины $V_{вер}$ отмечено только для значений Q в пределах 0,16–0,24М.

Анализ изменения усреднённых максимальных значений $V_{вер}$ показал, что увеличение интенсивности продувки Q во всех исследованных вариантах обеспечивает повышение её величины в потоках разной направленности, причём независимо от величины P и расположения продувочного блока фурм ($R\phi$ и $\angle\phi$). Увеличение P при $Q = \text{const}$, в целом, способствует повышению $V_{вер}$ восходящих и нисходящих потоков, а увеличение $R\phi$, в рассмотренных пределах, обеспечивает рост колеблемости между крайними значениями анализируемого параметра для соответствующих потоков. Определено влияние $\angle\phi$ на величину $V_{вер}$ при $R\phi = \text{const}$.

Ранее установлено влияние величины мощности P от источника постоянного тока на изменение $V_{вер}$ восходящих и нисходящих потоков при разной интенсивности продувки [3]. В настоящих исследованиях для расширенного диапазона расхода аргона Q результатами расчёта величины $V_{вер}$ в зависимости от изменения $\angle\phi$ для $R\phi = 0,6 R\phi_n$ определено следующее. При $\angle\phi=0,5\alpha$ во всем диапазоне изменений Q и P обеспечивается незначительное снижение (на 1–2 % отн.) $V_{вер}$ восходящих и повыше-

ние на 12–25 % отн. $V_{вер}$ нисходящих потоков по сравнению с соответствующими значениями $V_{вер}$ для $\angle\phi=1,0\alpha$. В то же время увеличение $\angle\phi$ до $1,5\alpha$ способствует увеличению на 10–15 % отн. $V_{вер}$ восходящих и до 10 % отн. $V_{вер}$ нисходящих потоков.

Увеличение $R\phi$ с $0,6 R_{дн}$ до $0,7 R_{дн}$ при $\angle\phi=1,0\alpha$, независимо от значений P и Q , не изменяет величины $V_{вер}$ потоков разной направленности по сравнению с величиной соответствующего параметра при $R\phi = 0,6 R_{дн}$ и $\angle\phi=1,0\alpha$. Одновременно установлено, что уменьшение $R\phi$ от $0,6 R_{дн}$ до $0,5 R_{дн}$ и далее до $0,4 R_{дн}$ при $\angle\phi=1,0\alpha$ обеспечивает увеличение $V_{вер}$ восходящих (до 10 % отн. и до 20 % отн. соответственно) и нисходящих (до 15 % отн. и до 30 % отн. соответственно) потоков. Необходимо отметить увеличение установленного влияния на $V_{вер}$ восходящих потоков с повышением Q .

Таким образом, результаты анализа расчёта изменения величины вертикальной составляющей скорости $V_{вер}$ подтвердили наибольшую значимость интенсивности продувки Q , а также влияние мощности нагрева P и расположения ($R\phi$ и $\angle\phi$) продувочного блока фурм на характер массопереноса расплава в ковшовой ванне ёмкостью 140т при обработке на УКП постоянного тока.

На следующем этапе исследования особенностей массопереноса расплава анализировали результаты расчёта $\tau_{уср}$ и $OЗЗ$ в ковшовой ванне в зависимости от изменения переменных факторов Q , P , $R\phi$ и $\angle\phi$. На рис.3 и рис.4 представлены результаты изменения расчётных параметров при разных значениях переменных факторов по сравнению с фактически используемым вариантом компоновки днища ковша на УКП–140 переменного тока ПАО «ЕМЗ».

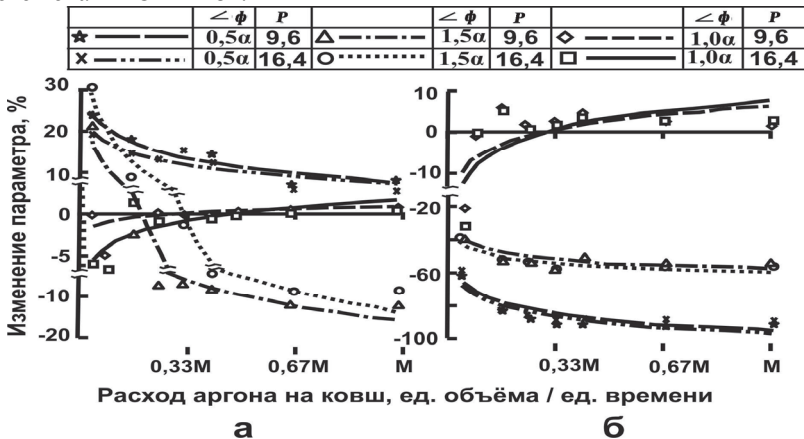


Рис.3. Изменение продолжительности усреднения добавки (а) и объема застойных зон в ванне (б) в зависимости от интенсивности продувки Q и мощности электродугового нагрева P расплава при $R\phi = 0,6 R_{дн}$ с различными значениями $\angle\phi$.

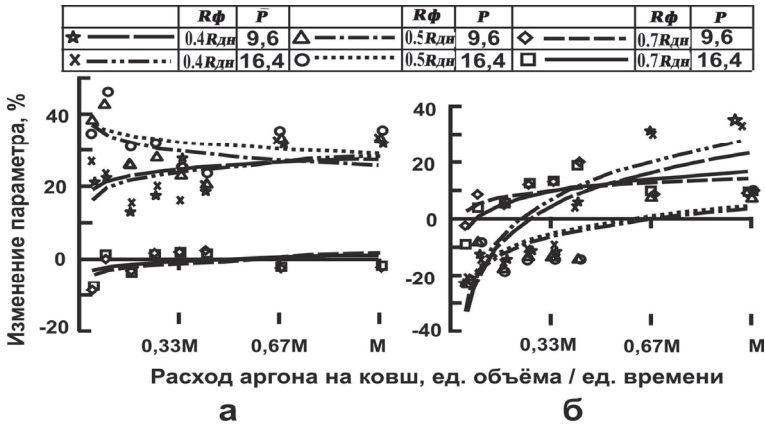


Рис.4. Изменение продолжительности усреднения добавки (а) и объёма застойных зон в ванне (б) в зависимости от интенсивности продувки Q и мощности электродугового нагрева P расплава при $\angle\phi = 1,0\alpha$ с различными значениями $R\phi$.

Установлено, что сокращение $\tau_{ср}$ возможно за счёт увеличения $\angle\phi$ до $1,5\alpha$ при изменении мощности нагрева в исследованных пределах и увеличения интенсивности продувки Q более $0,25 M$ и Q менее $0,25 M$ для $\angle\phi = 1,0\alpha$ (рис.3а), либо за счёт увеличения $R\phi$ до $0,7 R_{дн}$ при значениях Q менее $0,33 M$ и $\angle\phi = 1,0\alpha$ (рис.4а). Определено также, что уменьшению $\tau_{ср}$ и сокращению $O33$ при значениях Q менее $0,33M$ и $\angle\phi = 1,0\alpha$ должно способствовать увеличение P (рис.3). Сокращению $O33$ в ванне с расположением продувочного блока на $R\phi = 0,6 R_{дн}$ будет также способствовать изменение $\angle\phi$ на $1,5\alpha$ и на $0,5\alpha$. Такое изменение $\angle\phi$ приведет к существенному уменьшению рассматриваемого параметра (до 60 % отн. и до 90 % отн. соответственно) во всём диапазоне значений Q (рис. 3б). Уменьшение $R\phi$ до минимального значения при $\angle\phi = 1,0\alpha$ также будет обеспечивать сокращение $O33$ при нагреве ванны в рассмотренном интервале значений P и в интервалах расхода аргона от $0,67M$ (для $R\phi = 0,5 R_{дн}$) и от $0,24M$ (для $R\phi = 0,4 R_{дн}$) до минимальных значений Q (рис.4б).

Анализ влияния рассмотренных переменных факторов на параметры массопереноса расплава в ковше ёмкостью 140т в процессе нагрева на УКП постоянного тока свидетельствует о том, что рациональной для достижения эффективного перемешивания ванны предположительно будет продувка аргоном через донный продувочный блок из двух фурм с интенсивностью в пределах от минимума до $0,40M$.

Выводы

1. Численно изучены и визуализированы особенности массопереноса расплава в ванне ёмкостью 140т при обработке на УКП постоянного тока.

2. Підтверджено превалируюче вплив інтенсивності продувки ванни аргонем Q , а також вплив потужності електродугового нагріву P і конструктивно-компоновочного розположення донного продувочного блоку ($R\phi$ і $\angle\phi$) на особливості масопереносу в ковше ёмкістю 140т при обробці на УКП постійного тока.

3. Определены соотношения переменных факторов (Q , P , $R\phi$ и $\angle\phi$), обеспечивающие достижение наиболее эффективного перемешивания расплава в ковшовой ванне УКП с учётом э.м.с. электродугового нагрива от источника постоянного тока.

4. Установлены рациональные энергосберегающие пределы интенсивности продувки ковшовой ванны аргонем в процессе нагрива расплава на УКП постоянного тока.

1. *Winter F.D., Jaskson C.L.* The influence of secondary steelmaking on the production of high quality billets forging application // 2nd European Electric Steel Congress. Part 1. Florence, Italy. – 29th September – 1 October. – 1986. –P.R1.7/1–23
2. *Савов П., Баканов Н.* Кофьчна пещ с постоянен ток ИЧМ–НППЕ в ЕСДЦ «Мир» на ПК «Бл.Попов»//Металургия. – 1988. – №2. –С.22–26
3. *Факторы* влияния на параметры перемешивания расплава при обробці на установке ковш– пещ постоянного тока / В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, С.Е.Самохвалов и др. // Тр. XI междунар. Конгресса сталеплавильщиков – ТРАНСМЕТ 2010, 3–8 октября 2010, Нижний Тагил: М. Черметинформация, 2011. – С. 283–288
4. *Параметры* моделирования тепловых процессов в ванне установки ковш–пещ / В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, С.Е.Самохвалов и др. // Процессы литья.– 2009. –№5. – С.34–41

*Статья рекомендована к печати
докт.техн.наук А.С.Вергуном*

***В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, В.Ф.Поляков, И.В.Крикент,
С.В.Греков, В.А.Буриштин***

Особливості масопереносу у ванні місткістю 140т установки ківш–пич постійного струму

Чисельним моделюванням виявлено особливості масопереносу у ванні місткістю 140т при обробці розплаву на установці ківш–пич постійного струму. Оцінено вплив змінних чинників на ефективність перемішування розплаву в ковші. Визначено раціональні параметри продування при нагріві розплаву на устаткуванні такого типу.