

**В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов*, С.В.Греков, Д.Ю.Кабаков*,
А.А.Аносова**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛО-,
МАССОПЕРЕНОСА В ВАННЕ НАПОЛНЯЕМОГО КОВША**

*Институт черной металлургии НАН Украины
Днепропетровский государственный технический университет (ДГТУ)**

Представлены результаты численного моделирования гидродинамики и тепло-, массопереноса в ванне наполняемого расплавом сталеразливочного ковша. Показано, что сокращение продолжительности периода выпуска плавки и обеспечение продувки расплава в течение всего периода наполнения ковша обеспечит повышение интенсивности тепло-, массопереноса и уменьшение градиента температуры металла в объеме ванны.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, моделирование, гидродинамика, тепло-, и массоперенос

Состояние вопроса. В последние годы производство стали в электропечах занимает второе место в мире после конвертерного способа и характеризуется ежегодным ростом объемов выплавки [1]. Как и в современных конвертерных цехах производство электростали предусматривает использование внепечной обработки выплавляемого металла. Первый этап обработки металла заключается в дополнительном (после плавильного агрегата) его раскислении, легировании, рафинировании и т.д. за счет ввода ряда материалов-добавок в наполняемый расплавом сталеразливочный ковш на выпуск плавки.

Действующими в настоящее время стандартами и принятыми на предприятиях технологическими нормативными документами предусматривается такой порядок ввода материалов-добавок, когда они должны направляться под струю истекающего из плавильного агрегата металла. В то же время имеются данные [2], свидетельствующие о том, что кусковые материалы-добавки рекомендуется вводить в зону у стенки ванны наполняемого ковша для более эффективного их использования. Собственными исследованиями [3] установлено, что в разных зонах наполненной ковшовой ванны в зависимости от условий ее продувки могут наблюдаться различные, как по характеру, так и по величине соответствующих параметров, условия массо-, и теплопереноса. Однако аналогичные процессы в наполняемом ковше еще недостаточно изучены.

Поэтому изучение гидродинамики и теплового состояния расплава в наполняемом ковше и их учет для минимизации потерь, используемых на этом этапе дорогостоящих материалов – добавок, является актуальной задачей.

Цель работы. Исследование гидродинамики и тепло-, массопереноса в ванне наполняемого расплавом ковша емкостью 60 т на выпуске плавки из дуговой сталеплавильной печи (ДСП).

Результаты исследований и их анализ. Ниже представлены результаты численных исследований гидродинамики и тепло-, массопереноса расплава при наполнении ковшовой ванны во время выпуска плавки из ДСП.

Исследования проводили с использованием последних версий программ реализации трехмерных математических моделей соответствующих процессов [4].

Результаты исследований гидродинамики анализировали по контурным диаграммам усредненной по высоте ванны вертикальной составляющей скорости потоков расплава в разные моменты наполнения ковша металлом (от 20% наполнения ковша до его полного наполнения) и полям скорости в аналогичные моменты наполнения ванны без продувки и с дополнительной продувкой аргоном (рис.1). В расчетах учитывалась реальная конусность ковшовой ванны, используемая в электросталеплавильном цехе №3 ПАО «Днепроспецсталь» [5].

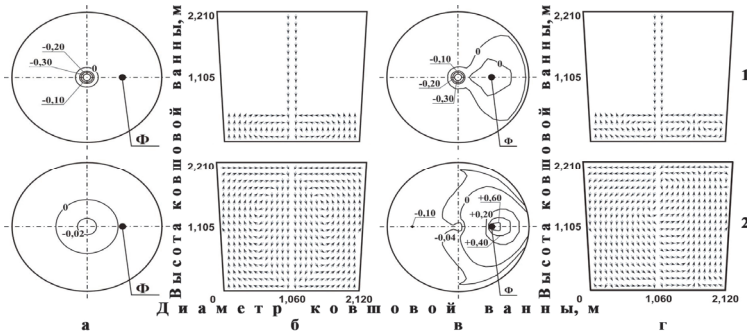


Рис.1. Контурные диаграммы скорости потоков расплава и поля скоростей при наполнении ванны ковша на 20% (1 а и 1 б соответственно) и в момент завершения наполнения ковша (2 а и 2 б соответственно) без продувки и с продувкой аргоном в те же моменты процесса (1 в, 1 г, 2 в и 2 г соответственно). Расход аргона – 0,16 М, л/мин.

В исследованиях варьировали расходом аргона через донный продувочный узел в диапазоне от $0,04M$ до $1,0M$, где M - выбранный в исследованиях максимальный расход аргона, л/мин. Продолжительность выпуска плавки, учитываемая в исследованиях, составляла 180-420с.

Определено, что в начальный период выпуска плавки (20-40 % наполнения ковша) наблюдается расширение зоны нисходящих потоков под истекающей струей металла с сохранением величины скорости на уровне - 0,3 м/с в осевой зоне ковша. Эта зона (от минимума в начале выпуска до приблизительно $0,5 R_{\text{дн}}$ ковша, где $R_{\text{дн}}$ - радиус днища ковша,

при наполнении на 40%) возрастает по мере наполнения ковша. При этом гидродинамика ванны вне зоны нисходящих потоков имеет слабовыраженный восходящий характер со значениями скорости от 0,003 до 0,005 м/с. В зоне восходящих потоков максимальные значения скорости отмечены на расстоянии $0,3 R_{\text{дн}}$ при 20% наполнении и последующим смещением этой зоны на $0,5 R_{\text{дн}}$ при 40%. С увеличением уровня наполнения ковша до 60 и 80% отмечено постоянное уменьшение величины скорости нисходящих потоков в осевой зоне ковша под струей с $-0,2$ до $-0,15$ м/с. Приблизительно к середине уровня наполнения ковша зона нисходящих потоков, расширившись примерно до $1/3$ диаметра ковша, сохраняет свой размер вплоть до завершения наполнения. Скорость нисходящих потоков в конце наполнения снижается до минимума ($-0,02$ м/с), а восходящих незначительно увеличивается до $0,01$ м/с.

Из данных о полях скорости (рис.1) следует отметить образование симметричных вихрей, начиная от 40% наполнения. При дальнейшем наполнении ковша центральная часть вихрей смещается вверх, сосредотачиваясь примерно на уровне $2/3$ высоты ванны. Такой вариант наполнения ковша характеризуется симметричными и идентичными по направлению и величине скоростями потоков расплава во всех вертикальных сечениях.

Для аналогичных моментов наполнения ковша с одновременной продувкой аргоном через фурму, расположенную на расстоянии $0,53 R_{\text{дн}}$ с фиксированным расходом газа в течении всего выпуска, на рис.1 также представлены контурные диаграммы. В данном случае продувка ванны формирует иную гидродинамическую картину по ходу ее наполнения. В начальный период (от 20 до 40 % наполнения) в районе подачи газа наблюдаются зоны восходящих потоков с увеличением их скорости от 0,08 до 0,25 м/с над фурмой. Нисходящие потоки (под истекающей струей) имеют скорости от $-0,1$ до $-0,3$ м/с в начале и от $-0,04$ до $-0,25$ м/с к 40 % накопления ванны. Одновременно происходит уменьшение зоны восходящих потоков в диаметрально противоположной части ванны ковша относительно фурмы. При наполнении ковша от половины уровня до 80 % зона нисходящих потоков занимает преобладающую часть ванны с концентрацией максимальных значений скорости в ней до $-0,4$ м/с. В момент завершения наполнения ванны ковша зона нисходящих потоков со сравнительно меньшей величиной скорости имеет менее выраженный локальный характер, а восходящих (над фурмой) увеличивает скорость до $0,6$ м/с и размеры.

Поля скоростей такого варианта наполнения ванны подтверждают вышеописанный характер гидродинамического состояния ванны.

Особенности изменения скорости потоков по ходу наполнения ковша в зависимости от интенсивности продувки ванны (результаты здесь не приведены) свидетельствуют о формировании потоков разной

из ДСП, наличие или отсутствие одновременной продувки ванны аргоном через донную фурму с интенсивностью в том же интервале расходов, что и в исследованиях гидродинамики ванны.

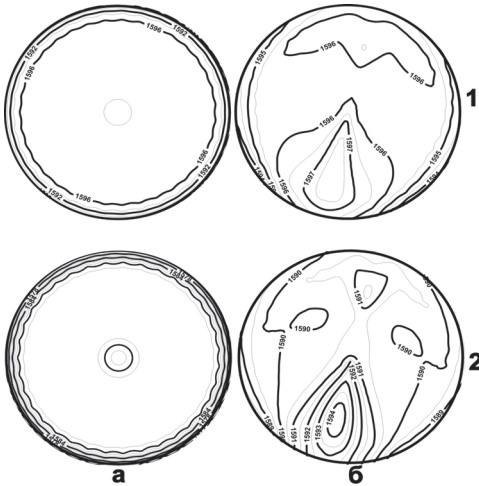


Рис.4. Средняя по высоте температура расплава в ковшовой ванне без продувки (а) и с продувкой (0,08М, л/мин) (б) в момент окончания её наполнения для разной продолжительности выпуска (180с – (1), 420с – (2)).

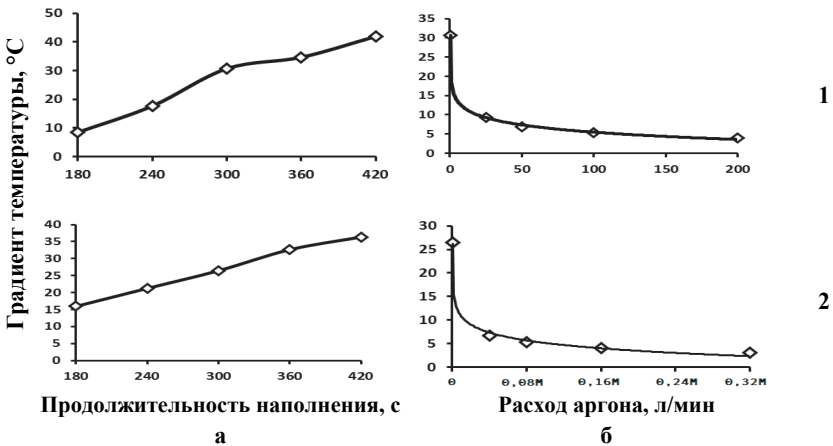


Рис.5. Изменение градиента температуры расплава в объеме ванны (1) и в слое расплава, прилегающем к стенке ковша (2), в момент окончания его наполнения при разной продолжительности выпуска без продувки (а) и с разной интенсивностью продувки при продолжительности выпуска – 300с (б).

Дополнительно в качестве анализируемого параметра моделируемых процессов рассчитывали температуру металла (минимальные, максимальные и средние значения), оценивали ее градиент и средние ее

значения в объёме и у стенок ванны ковша по ходу наполнения и в момент завершения процесса.

Анализ представленных данных подтверждает результаты исследования гидродинамики наполняемого ковша о влиянии дополнительной донной продувки ванны в период выпуска плавки и на тепловое состояние расплава по сравнению с выпуском без продувки. Установлено снижение градиента температуры расплава с увеличением интенсивности продувки ванны и уменьшением продолжительности выпуска плавки из ДСП в ковш. Определено также, что снижение градиента температуры с уменьшением продолжительности выпуска плавки сохраняется как для продуваемой, так и не продуваемой аргоном наполняемой ванны.

Достигнутая в период наполнения ванны ковша более высокая гомогенность расплава по температуре за счет перечисленных факторов должна, по всей видимости, способствовать сравнительно меньшим энергетическим затратам на последующем этапе внепечной обработки стали (установка ковш-печь, УКДС, аргонный стенд) при доводке металла по температуре. Кроме этого полученные результаты также, вероятно, позволят уменьшить расход огнеупорных футеровочных материалов ковша в связи с более равномерным нагревом боковой стенки и днища и, таким образом, создадут условия постепенного разогрева рабочей поверхности ванны, исключив локальные термоудары.

Выводы

1. Установлено благоприятное влияние донной продувки наполняемого расплавом сталеразливочного ковша емкостью 60т в процессе выпуска плавки из ДСП на гидродинамику ванны, выраженное в повышении скорости потоков расплава и изменении их распределения.

2. Показано, что сокращение продолжительности периода выпуска плавки и обеспечение продувки расплава в течение всего периода наполнения ковша обеспечит повышение интенсивности тепло-, массопереноса и уменьшение градиента температуры металла в объёме ванны.

1. *Белковский А.Г., Кац Я.Л., Краснянский М.В.* Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций // Бюллетень «Черная металлургия». – 2013. – №3. – С.72-88
2. *Вихлевицук В.А., Харахулах В.С., Бродский С.С.* Ковшевая доводка стали. – Днепропетровск. – Системные технологии, 2000. - 190с.
3. *Массо-, теплоперенос в ванне емкостью 140т установки ковш-печь переменного тока / В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.А.Павлюченков и др.* // Сталь. – 2007. – №11. – С.47-50

4. *Совершенствование* математических моделей и результаты численного исследования гидродинамики расплава наполняемого ковша. / В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, Д.Ю.Кабаков, С.Н.Павлов, С.В.Греков. // Математичне моделювання. – 2012. – №27. – С.84-88
5. *О перемешивании* расплава на установке ковш-печь переменного тока малой мощности. / В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, С.Е.Самохвалов и др. // Сб. науч. трудов «Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали». – Донецк, 2011, 25-26 октября. – С.75-81.

*Статья рекомендована к печати
докт. техн. наук, проф. А.Г.Чернятевичем*

В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, С.В.Греков, Д.Ю.Кабаков, А.О.Аносова

Моделювання процесів гідродинаміки і тепло-, масопереносу в ванні наповнюемого ковша

Представлені результати чисельного моделювання гідродинаміки і тепло-, масопереносу у ванні наповнюється розплавом сталеразливного ковша. Показано, що скорочення тривалості періоду випуску плавки і забезпечення продувки розплаву протягом усього періоду наповнення ковша забезпечить підвищення інтенсивності тепло-, масопереносу і зменшення градієнта температури металу в об'ємі ванни.

Ключові слова: сталеразливний ківш, моделювання, гідродинаміка, тепло-, і масоперенос

V.P.Pipyuk, S.E.Samohvalov, S.V.Grekov, D.Y.Kabakov, A.O.Anosova

Modelling of processes of hydrodynamics and heat and mass transfer in the bath fill the bucket

The results of numerical simulation of fluid flow and heat and mass transfer in the filled bath melt ladle. It is shown that the shortening of the period and providing the tapping of the melt blowing over the entire period of filling the bucket provide increased intensity of heat- and mass-transfer and reducing the temperature gradient in the volume of the metal bath.

Keywords: casting ladle, modeling, fluid dynamics, heat, and mass transfer