

УДК 669.18

Гресс А. В., Стороженко С. А.

КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

На современном этапе развития металлургии, в частности литейного производства, особенно актуальным становится вопрос повышения конкурентоспособности литой продукции. Решение этого вопроса напрямую связано с повышением качества подготовленного к разливке металла на фоне снижения материальных и энергетических затрат. Это возможно посредством создания и совершенствования технологий и конструкций соответствующих металлургических агрегатов, направленных на повышение качества литья, и, в частности, связанных с использованием современных методов внепечной обработки литейных расплавов.

Следует сказать, что научных работ в этом направлении известно немало [1–6]. Как правило, большинство подобных работ связано с исследованием тепло- и массообменных процессов в ковшах большой вместимости. Литейные же ковши малой и средней вместимости (далее – литейные ковши) сейчас используются, в основном, в качестве ёмкостей для транспортировки металла к месту разливки и не являются, по мнению некоторых учёных, объектом исследований.

Причиной слабого использования литейных ковшей как самостоятельных металлургических агрегатов для дополнительной обработки металла, по нашему мнению, является не учёт многих факторов, предопределяющих специфику их эксплуатации. В отличие от ковшей большой вместимости, литейные ковши, ввиду их относительно небольших размеров, обладают рядом недостатков. Недостатки связаны, главным образом, с большой скоростью остывания в них металла и невысокой скоростью естественных конвективных потоков жидкости. Все это, в совокупности, предполагает определенную трудность проведения в таких ковшах дополнительных операций по раскислению, легированию, модифицированию и рафинированию металла от неметаллических включений. Таким образом, актуальность исследований тепло- и массообменных процессов в литейных ковшах с целью разработки и совершенствования технологий и конструкций соответствующих металлургических агрегатов, обеспечивающих повышение качества литья на фоне снижения материальных и энергетических затрат, является очевидной. Знание закономерностей процессов, протекающих при внепечной обработке металла в литейных ковшах, позволит поднять на новый уровень управление качеством металлопродукции.

Целью работы является повышение эффективности работы литейных ковшей как дополнительных металлургических агрегатов для внепечной обработки металла посредством комплексного подхода, предполагающего применение аппарата концептуального, физического и математического моделирования с элементами оптимизации.

В частности, на основе критического анализа существующих конструкций литейных ковшей и технологий внепечной обработки металла предложены, реализованы в виде физических и математических моделей новые металлургические системы, объединяющие преимущества классических.

Для определения жизнеспособности предложенных технических решений в лабораторных условиях следует провести исследования по изучению гидродинамической обстановки в жидком металле в процессе его доводки. Это позволит получить, с учетом теплового состояния среды моделирования, сравнительные количественные характеристики движения гидродинамических потоков расплава при продувке газом металла в литейных ковшах штатной конструкции и при наличии, в том числе, в их полости фильтрующей перегородки. Знание количественных закономерностей распределения потоков жидкого металла в объеме ковша даст возможность рассчитать оптимальное местоположение зон подачи дополнительных реагентов.

При исследованиях гидродинамики стали в процессе ее продувки аргоном в литейных ковшах нами использовались методы физического моделирования [7, 8]. Из бесконтактных методов наиболее дешёвым и простым в реализации при достаточной точности является метод «треков», который недостаточно точен, что предопределяет невысокую степень достоверности полученных результатов при их высокой наглядности. Наиболее привлекательным из зондовых, более точных, методов представляется интенсивно развивающееся новое направление исследования локальных характеристик потоков – электродиффузионная диагностика, основанная на зависимости величины тока, протекающего между помещенными в поток электродами, от скорости обтекания рабочего электрода электролитом заданного состава. Совместное использование этих методов позволит получить новые, более точные и достоверные закономерности поведения потоков расплавов в литейных ковшах.

При численном трехмерном моделировании гидродинамики в разливочном ковше следует применять сопряженную математическую модель гидродинамики и теплопереноса в двухфазной среде газ – расплав в литейном ковше, продуваемом через донную фурму [9]. Турбулентный характер движения учтен здесь использованием эффективных коэффициентов вязкости и температуропроводности среды, включающих в себя турбулентные составляющие алгебраической модели турбулентности. Все уравнения дополнены соответствующими граничными условиями. Поставленные задачи решались численно в соответствии с методом расщепления по физическим факторам. Использование такого подхода к решению сопряженных задач тепломасс обмена и гидродинамики в совокупности с физическим моделированием позволило получить новые сведения о процессах, протекающих в литейных ковшах.

Практическая реализация соответствующих экспериментов связана с проведением огромного числа опытов. Поэтому весьма целесообразно применение методов проведения активных экспериментов по плану ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП), что позволит получить искомые регрессионные зависимости второго порядка [10].

Применение генетических и эволюционных алгоритмов оптимизации, которые являются алгоритмами случайно-направленного поиска, позволят решить задачу поиска глобального экстремума соответствующих многоэкстремальных функциональных зависимостей, что и является особенностью данных исследований [11, 12].

Изготовление в лабораторных условиях модели однотонного ковша в масштабе 0,6 реального образца предопределило возможность нахождения не только качественных, но и количественных характеристик объекта исследований [13, 14]. Проведенный комплекс исследований позволил подробно изучить гидродинамические явления в металлической ванне при подаче в реальный агрегат газа с интенсивностью 1,2–3,2 л/(т·мин.), в частности, найдены направления и количественные закономерности скоростей потоков металла в объеме исследованного литейного ковша при различной интенсивности продувки. Кроме того, в результате экспериментов определено:

1. Поведение газожидкостной струи в объеме жидкости носит нестабильный характер, что выражается в изменении ее формы и угла отклонения от вертикальной оси (0–10°). По мере роста расхода продувочного газа угол раскрытия струи увеличивается и она смещается от оси ковша.

2. В объеме ковша при его продувке находится несколько относительно стабильных замкнутых гидродинамических потоков, интенсивность и число которых определяются, соответственно, расходом газа и расположением продувочного узла.

3. Поверхность шлака при исследованных режимах продувки практически не имеет волн, в то время, как граница раздела шлак – металл находится в постоянном движении. В результате продувки возникают концентрические волны, расходящиеся радиально от центра «глаза» к стенкам ковша. Амплитуда волн увеличивается по мере роста интенсивности продувки, достигая значений, при которых происходит отрыв капель шлака и их «запутывание» в объеме металла.

При исследовании методами физического моделирования особенностей гидродинамики металла в литейном ковше, оборудованном фильтрующей перегородкой, предварительно проведенная серия экспериментов позволила установить, что фильтрующая перегородка должна иметь форму половины горизонтального сечения ковша и устанавливаться симметрично над донным продувочным устройством [15, 16]. Определено, что характер поведения газожидкостных потоков зависит от высоты расположения перегородки над донной фурмой и относительной площади отверстий в перегородке, в частности:

1. Наиболее эффективным является размещение фильтрующей перегородки на 0,5 высоты налива металла. В этом случае возникает достаточная объемная реакционная зона с развитой вихревой гидродинамической структурой, что обеспечивает интенсификацию рафинирования стали от неметаллических включений.

2. Общей тенденцией во всех исследованных случаях стало появление дополнительных потоков металла, огибающих перегородку в районе вертикального осевого сечения ковша. Немаловажной положительной чертой во всех случаях было практическое отсутствие оголенной от шлака поверхности металла над донной фурмой (так называемого «глаза») и «пробойных» режимов в исследованном диапазоне расходов газа, что объясняется «рассеивающим» эффектом фильтрующей перегородки.

3. Для более полного и интенсивного процесса рафинирования металла от неметаллических включений следует увеличить путь движения металла до шлакового покрова. Определено, что для этого в фильтрующей перегородке, относительная площадь сечения отверстий в которой составляет около 40 %, должны быть выполнены отверстия с углами наклона к оси ковша от 0 до 45°, которые определяются местонахождением относительно вертикальной плоскости симметрии ковша и расстоянием от его днища.

Данные физического моделирования были использованы для установления адекватности разработанной нами сопряженной численной модели гидродинамики и теплопереноса в двухфазной среде газ – расплав в литейном ковше [17–19], продуваемом через донную фурму.

С помощью разработанной нами математической модели выполнена серия расчетов процессов тепломассопереноса в литейном ковше в процессе продувки расплава через донную фурму при различных расходах газа, которая позволила заключить:

1. При увеличении интенсивности продувки, очевидно, скорость охлаждения металла увеличивается, что объясняется увеличением теплоотдачи с поверхности ковша вследствие более интенсивной теплопередачи от горячих порций металла.

2. Увеличение интенсивности продувки приводит к росту однородности температурных полей по объему ковша, что, несомненно, связано с увеличением интенсивности перемешивания расплава.

В процессе численного моделирования исследовали тепло- и массообменные процессы, протекающие в реальных литейных ковшах садкой 1, 5, 10, 16, 20, 25, 30, 40, 50 т, продуваемых инертным газом снизу через одну донную фурму с интенсивностью 1,2–3,2 л/(т·мин) и оборудованные, в том числе, фильтрующей перегородкой.

При общей схожести картины распределения скоростей в агрегатах различной вместимости наблюдаются некоторые особенности и закономерности. Так, по мере увеличения размеров ковша, возрастает скорость потоков металла в области, расположенной по другую сторону относительно оси агрегата от места подачи газа.

Эксперименты проводили по плану ОЦКП. Анализ результатов статистической обработки (доверительная вероятность всех статистических расчетов принята равной 95 %) данных численных экспериментов позволил сделать вывод о нелинейном характере уменьшения средних скоростей движения расплава по мере увеличения вместимости ковшей при неизменной интенсивности продувки. Такой же нелинейный характер носит зависимость средних скоростей потоков расплава от садки агрегата:

$$W_{\text{cp}} = 1,62 \cdot 10^{-2} - 6,99 \cdot 10^{-4} \cdot m + 7 \cdot 10^{-2} m^2 + 9,78 \cdot 10^{-3} i - 7,5 \cdot 10^{-4} i^2$$

при $R=0,87$, $R^2=0,75$, (1)

где W_{cp} – средние скорости потоков расплава, м/с; m – вместимость ковша, т; i – интенсивность продувки, л/(т·мин); R – коэффициент множественной регрессии; R^2 – коэффициент детерминации.

Определено:

1. При неизменной интенсивности продувки скорость гомогенизации расплава в ковшах малой садки будет выше, чем в больших ковшах.

2. По мере роста садки ковша влияние интенсивности подачи газа на время гомогенизации уменьшается.

С использованием найденной нами количественной зависимости (1) скоростей перемещения потоков металла от садки агрегата и интенсивности продувки, можно, исходя из условий производства (времени выдержки в ковше, состояния футеровки, скорости разлива и т. п.), определить желаемую для каждого конкретного случая интенсивность продувки.

На основании статистического анализа найдены регрессионные зависимости локальных скоростей потоков жидкости в объёме литейного ковша от интенсивности продувки и местоположения контрольных точек в ковше. Обобщающая зависимость имеет вид:

$$W = 0,053032 - 0,000196 \cdot m + 0,001708 \cdot i + 0,152132 \cdot r + 0,106456 \cdot r^2 - 0,000022 \cdot fi - 0,031234 \cdot h + 0,024045 \cdot h^2$$

при $R=0,69$, (2)

где W – локальная скорость потоков жидкости в объёме литейного ковша, м/с; r – расстояние до контрольных точек в ковше (от $-r$ до 0), м; h – расстояние от контрольных точек в ковше до днища ковша, м; fi – угол нахождения расчётного сечения относительно вертикального сечения ковша, проходящего через ось фурмы ($180-270^\circ$), при нахождении фильтрующей перегородки на $1/2$ высоты налива металла (для ковша предложенной конструкции).

Зная значения локальных скоростей потоков металла, можно с достаточной степенью достоверности рассчитать длительность усвоения добавок и, соответственно, требуемую массовую скорость их ввода.

Установлено, что при наличии в полости литейного ковша фильтрующей перегородки с целью более полного усвоения металлом дополнительные реагенты следует вводить в заданные зоны его пространства, характеризующиеся направленными вниз потоками жидкости.

Подтверждено, что по мере роста интенсивности продувки средние скорости жидкости увеличиваются. Найдена закономерность увеличения скоростей потоков при уменьшении вместимости ковша, что предполагает возможность снижения интенсивности подачи газа в малых литейных ковшах при получении той же мощности перемешивания.

На основании решения оптимизационной задачи определено пространственное местоположение в объёме жидкого металла глобальных экстремумов абсолютных значений скоростей потоков металла в литейных ковшах, как типовой конструкции, так и оборудованных фильтрующей перегородкой, и продуваемых снизу инертным газом с заданной интенсивностью.

Следует подчеркнуть, что значения экстремумов скоростей потоков металла и расположение их в объёме литейных ковшей исследованной конструкции эксклюзивно для каждого конкретного случая.

ВЫВОДЫ

С использованием методов физического и математического моделирования получена недостающая достоверная информация о характере и скорости движения потоков расплава, распределении температурных полей при донной продувке литейных ковшей, в том числе оборудованных фильтрующей перегородкой.

Найденные количественные закономерности зависимости скоростей потоков металла в исследованных ковшах от их садки и интенсивности подачи газа позволили определить оптимальные зоны ввода дополнительных реагентов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследования тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковши-печь. Ч.1. Математическая модель / В. П. Пиптюк [и др.] // Теория и практика металлургии. – 2008. – № 3. – С. 3–5.
2. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 1 / А. Н. Смирнов [и др.] // Процессы литья. – 2008. – № 4. – С. 41–48.
3. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 2 / А. Н. Смирнов [и др.] // Процессы литья. – 2008. – № 5. – С. 30–35.
4. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 3 / А. Н. Смирнов [и др.] // Процессы литья. – 2009. – № 5. – С. 11–19.
5. Смирнов А. Н. Исследования процессов перемешивания металла в сталеразливочном ковше при продувке инертным газом / А. Н. Смирнов, С. Г. Жемеров, Д. А. Фоменко // Черная металлургия. – 2011. – № 8. – С. 58–61.
6. Моделирование продувки жидкой стали в ковше нейтральным газом / Е. В. Штапура [и др.] // Новости науки Приднепровья. – 2008. – № 1. – С. 112–114.
7. Модельные исследования гидродинамики процессов перемешивания стали в ковшах малой вместимости / С. П. Еронько, А. Н. Смирнов, А. Ю. Цупрун, И. Н. Салмаш // Металл и литье Украины. – 2006. – № 3–4. – С. 31–34.
8. Покрываило Н. А. Электродиффузионная диагностика течений в суспензиях и полимерных растворах / Н. А. Покрываило, О. Вайн, Н. Д. Ковалевская; [под ред. Солоухина Р. И.]. – Мн. : Наука и техника, 1988. – 230 с.
9. Математическая модель гидродинамики расплава в двухкамерном ковше / А. Г. Чернятевич [и др.] // Математичне моделювання. – 2000. – № 2 (5). – С. 102–106.
10. Белай Г. Е. Организация металлургического эксперимента / Г. Е. Белай, В. В. Дембовский, О. В. Соценко – М. : Металлургия, 1993. – 256 с.
11. Популярно о генетических алгоритмах. Исаев Сергей. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://algolist.manual.ru/ai/ga/ga1.php>.
12. Применение генетических и эволюционных алгоритмов оптимизации. Нейронные сети и анализ данных. Материал из сайта Виктора Царегородцева NeuroPro. [Электронный ресурс]. Режим доступа : <http://www.neuropro.ru/meto314.shtml>.
13. Гресс А. В. Физическое моделирование гидродинамики металлической ванны литейного ковша / А. В. Гресс, С. А. Стороженко // Зб. наук. пр., сер. «Металургія». – Запоріжжя : ЗДІА, 2011. – Вип. 24. – С. 19–24.
14. Гресс А. В., Стороженко С. А. Комплексные исследования гидродинамики металлической ванны в литейных ковшах / А. В. Гресс, С. А. Стороженко // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2011. – № 4 (25). – С. 50–55.
15. Гресс О. В. Физическое моделирование гидродинамики жидкого металла в литейном ковше, оборудованном фильтрующей перегородкой / О. В. Гресс, С. А. Стороженко // Зб. наук. пр., сер. «Металургія». – Запоріжжя : ЗДІА, 2013. – Вип. 2 (30). – С. 42–47. ISSN 2071-3789.
16. Стороженко С. А. О гидродинамике расплава в ковшах с фильтрующей перегородкой / С. А. Стороженко, А. В. Гресс // Металлургия машиностроения. – 2013. – № 3. – С. 2–5.
17. Гресс А. В. Математическое моделирование гидродинамики металлической ванны в литейном ковше / А. В. Гресс, С. А. Стороженко // Математичне моделювання, – 2011. – № 1 (24). – С. 71–74.
18. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в литейном ковше / А. В. Гресс [и др.] // Математичне моделювання. – 2011. – № 2 (25). – С. 119–122.
19. Гресс А. В., Стороженко С. А. Оптимизация пространственных координат точек ввода дополнительных материалов в литейные ковши / А. В. Гресс, С. А. Стороженко // Математичне моделювання. – 2012. – № 2 (27). – С. 42–47.