

дозволяє аналізувати і визначати прогалини в отриманих ним знаннях та навичках;

- забезпечення активної самостійної навчальної діяльності суб'єкта навчання;
- діагностування якості засвоєння суб'єктом навчання теоретичного матеріалу та його практичних застосувань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Горбатов В. А. Основы дискретной математики: Учебное пособие для вузов. — М.: Высш.шк., 1986. — 311 с.
2. Використання комп'ютерних технологій при викладанні курсу «Дискретна математика». Міждержавна науково-методична конференція. Проблеми математичного моделювання. Тези доповідей. м.Дніпродзержинськ. 2009. с. 210—213.

пост.03.04.13

Численные исследования гидродинамики металла в литейных ковшах, оборудованных фильтрующей перегородкой

А. В. ГРЕСС, С. А. СТОРОЖЕНКО

Днепродзержинский государственный технический университет

Методами математического моделирования исследована гидродинамика металла в литейных ковшах, оборудованных фильтрующими перегородками. На основании статистической обработки результатов численного эксперимента найдены оптимальные пространственные координаты точек ввода дополнительных материалов в полость исследованных литейных ковше

Методами математичного моделювання досліджена гідродинаміка металу в ливарних ковшах, обладнаних фільтруючими перегородками. На підставі статистичної обробки результатів чисельного експерименту знайдені оптимальні просторові координати точок уведення додаткових матеріалів у порожнину досліджених ливарних ковшів

The hydrodynamics of metal in casting bucket equipped by filter partition are researched by the method of mathematics modeling. On the basis of statistic studying of the results of numeral experiments optimal three - dimensional (spatial) coordinates of the points of bringing the additional materials into the researched casting bucket are found

Введение. В значительной мере показатели качества литейной продукции зависят от чистоты металла по газам и неметаллическим включениям, количество, состав и размеры которых в значительной степени определяются способами и режимами обработки стали. Одним из наиболее современных способов повышения надежности металлоизделий является ковшовая металлургия, многие положения которой применительно к продувке стали через донные фурмы достаточно широко освещены в печати (например, в [1-9]). Однако, среди известных способов удаления неметаллических включений в литейных ковшах незаслуженно мало внимания пока уделяется использованию такого современного технологического решения, как установка в их объеме различного рода фильтрующих перегородок. Для определения количественных характеристик гидродинамики металла при таком способе исполнения ковшей целесообразно использовать различные виды моделирования. В частности, наиболее простыми и доступными являются физическое и математическое моделирование.

Состояние вопроса. К наиболее «свежим» публикациям в этом направлении следует отнести работы [10-16]. Здесь решались схожие задачи по определению

теплового и гидродинамического состояния сталеразливочных ковше классической конструкции.

В настоящее время авторам не известны работы, в которых бы изучались соответствующие вопросы применительно к ковшам, оборудованным фильтрующей перегородкой (рис. 1, а).

Постановка задачи. Задачей настоящих исследований является численное исследование особенностей, получение сравнительных количественных характеристик движения гидродинамических потоков расплава и определение оптимальных пространственных координат точек ввода дополнительных реагентов при продувке газом металла в литейных ковшах, оборудованных фильтрующей перегородкой.

Изложение основного материала исследования. Задача решалась с использованием разработанной трехмерной математической модели сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в литейном ковше [13-16]. Схема расчетной области представлена на рис. 1, б.

При разработке модели предположили:

1. Зеркало металла является ровным, без волн, покрыто шлаком. Следовательно, нет необходимости учета динамики свободной поверхности.

2. Газожидкостная смесь несжимаема, а газовые пузыри движутся практически с теми же скоростями, что и слои окружающей жидкости. Такое допущение справедливо при неглубоком проникновении газа в жидкость, обеспечивает солениодальность движения смеси и значительно облегчает численное решение уравнений движения.

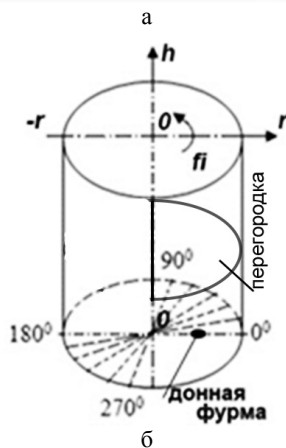
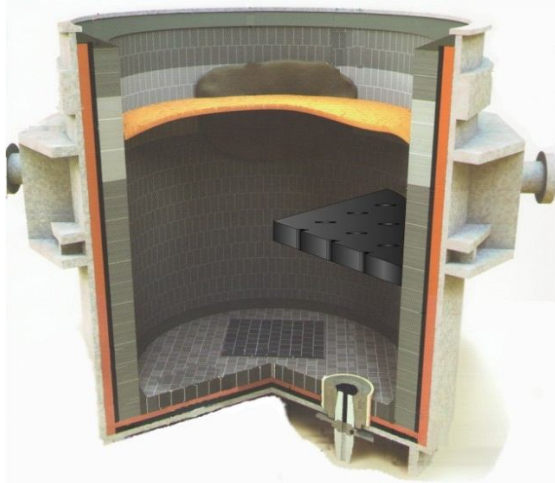


Рис. 1. Схема разливочного ковша с фильтрующей перегородкой

3. Газ не поглощается и не выделяется в процессе продувки, полностью удаляется из металла через зеркало металла и шлака.
4. У футеровки ковша тепловое состояние металла определяется условиями внешнего теплоотвода и зависит от скоростей потоков металла, омывающих футеровку.

Система уравнений, описывающая динамику среды газ-расплав, следующая:

$$\partial \vec{V} / \partial t = R(\vec{V}, \alpha) - \vec{\nabla} \tilde{p}, \quad (1)$$

$$R(\vec{V}, \alpha) = -(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \nu_e \Delta \vec{V} - \alpha \vec{g}, \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \vec{V} = \Psi, \quad (2)$$

$$\partial \alpha / \partial t = -\vec{\nabla}(\alpha(\vec{V} + \vec{W})) + \Psi, \quad (3)$$

и дополняется уравнением конвективного теплопереноса в газожидкостной среде, записанным в приближении малого α :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot [a_e (1 - \frac{2}{3} \alpha) \vec{\nabla} T] (1 - \alpha). \quad (4)$$

Здесь \vec{V} - барицентрическая скорость среды газ-расплав, t - время, Ψ и \vec{W} - объемный источник и диффузионная скорость газовой фазы, \tilde{p} - динамическая составляющая давления, деленная на плотность расплава, ν_e - коэффициент эффективной вязкости, \vec{g} - ускорение свободного падения. Кроме того, T - температура среды, а a_e - коэффициент эффективной теплопроводности среды. Коэффициенты ν_e и a_e включают в себя турбулентные составляющие алгебраической модели турбулентности.

Система уравнений (1) - (4) на каждом временном шаге τ , в соответствии с методом расщепления по физическим факторам, решается в три этапа [15].

На внутренних поверхностях ковша выбраны условия непротекания и свободного скольжения. На свободной поверхности металла выбраны условия свободного протекания. Учет подачи газа через фурму осуществляется путем введения в месте ее расположения источников газовой фазы объемной плотностью

$\Psi = \frac{q}{V_0} \vec{e}_z$, где q - расход газа через фурму и V_0 - объем зоны формирования барботажного режима в прифурменной области (в расчетах он принят равным объему расчетной ячейки). На фильтрующей перегородке приняты условия частичного проникновения потоков металла в соответствии с долей отверстий в общей ее площади.

При расстановке граничных условий в нашем случае важно точно обеспечить условие сопряжения всех характеристик среды (скоростей, давлений, плотностей газовой фазы, а также температуры) при $\varphi = 0$ и $\varphi = 2\pi$. Для облегчения этого расчетную область удобно представить в пространстве с координатами ρ , φ и z в качестве декартовых. В этом случае расчетная область принимает форму параллелепипеда, причем грань I, соответствующая значению $r = 0$, в реальной области вырождается в осевую линию, а грани II и III, соответствующие $\varphi = 0$ и $\varphi = 2\pi$, должны быть отождествлены. Таким образом, грани II и III следует связать условиями сопряжения, а на всех остальных границах следует выбрать условия непротекания и эффективной конвективной теплоотдачи.

В разностном виде с использованием шахматной сетки для удобства расстановки граничных условий расчетная область со всех сторон окаймляется слоем заграничных ячеек. В этом случае условия сопряжения на гранях II и III реализуются тем, что заграничные значения всех характеристик среды на одной из граней выбираются равными приграничным значениям на другой, и наоборот.

С целью проверки адекватности математической модели были проведены исследования гидродинамики металлической ванны на физической модели литейного ковша, выполненной в масштабе 0,6 реального образца. В качестве моделирующей жидкости использовали воду, нейтральный газ имитировали воздухом. Определяющими критериями при моделировании являлись числа Ar , La а также критерий гомохронности. Число Re находилось в области автомодельности.

Модель выполнена прозрачной, что позволило визуализировать потоки жидкости с помощью специальных маркеров, имеющих нулевую плавучесть. Газ подавался через донную пористую фурму с расходами, соответствующими реальным условиям. Схема установки физического моделирования представлена на рис. 2.

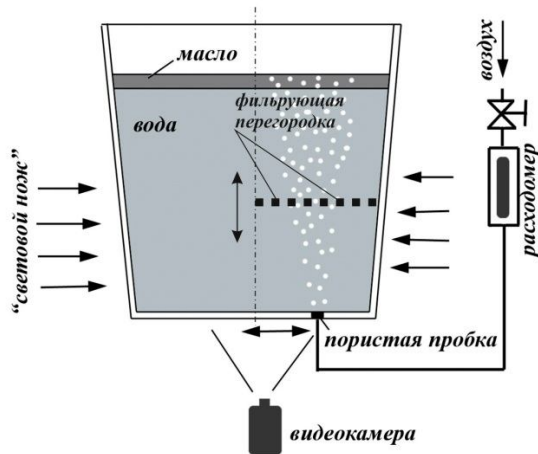


Рис. 2. Схема установки для моделирования гидродинамики металла в разливочных ковшах

Сравнение результатов численного и физического моделирования показало, что расхождение не превышает 10%, что позволяет утверждать об адекватности математической модели реальному процессу.

Моделировали гидродинамику металла в литейных ковшах, оборудованных донными продувочными фурмами, располагаемыми на различном расстоянии от оси ковша с подачей через них аргона с интенсивностью в диапазоне 1,2-3,2 л/(т·мин), а также фильтрующей перегородкой, устанавливаемой на заданной высоте от дна ковша с наличием отверстий, составляющих от 20 до 60 % от ее площади поверхности.

В качестве примера на рис. 3 приведено рассчитанное нами распределение скоростей потоков жидкости в половине (а) и в вертикальном сечении (б) 30-т ковша, проходящего через ось его симметрии и ось донной фурмы при подаче газа интенсивностью 2,2 л/(т·мин). Перегородка находится на 0,5 высоты налива металла и содержит отверстия площадью 40% от площади перегородки.

В результате численных экспериментов (проанализирован 81 вариант) подтверждено, что наилучшие условия гомогенизации жидкой ванны металла имеют место при расположении фильтрующей перегородки на расстоянии 0,5 высоты налива металла, а донной фурмы – под перегородкой на расстоянии 0,5 радиуса ковша, что предопределило условия проведения дальнейших численных экспериментов.

Для определения рациональных мест ввода модифицирующих и рафинирующих реагентов необходимо знать значения скоростей потоков металла в полости литейных ковшей.

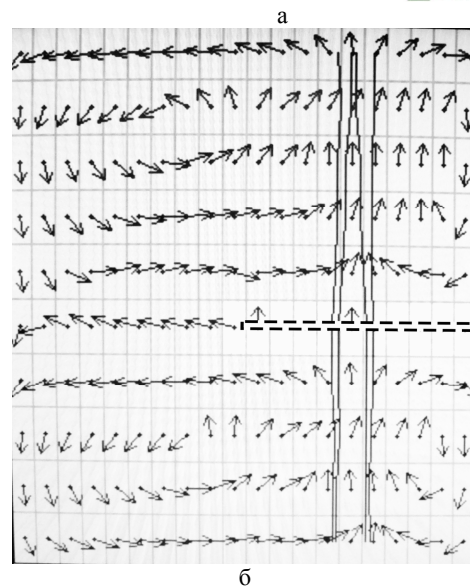
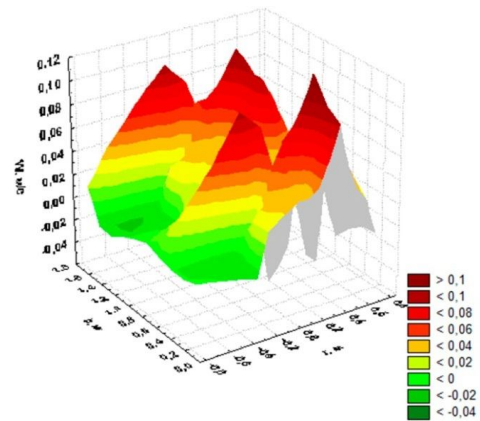


Рис. 3. Распределение скоростей потоков металла в литейном ковше: а – сектор ковша; б – сечение ковша

Очевидно, что при наличии в полости литейного ковша фильтрующей перегородки с целью более полного усвоения металлом дополнительные реагенты следует вводить в его пространство, свободное от перегородки и характеризующееся направленными вниз потоками жидкости. Для определения таких локальных мест ввода следует знать распределение скоростей в таких областях. Причем, ввиду симметричности исследуемой системы относительно плоскости, проходящей через ось ковша и донной фурмы, такое распределение скоростей целесообразно определить для четверти объема ковша (например сегмент цилиндра от 180 до 270 град, см. рис. 1, б).

На основании статистического анализа (доверительная вероятность всех статистических расчетов принята равной 95 %) найдены регрессионные зависимости скорости (W , м/с) потоков жидкости в объеме литейного ковша от интенсивности продувки i (л/(т·мин)) и местоположения контрольных точек в ковше (r – расстояние от оси ковша (от $-r$ до 0), м; h – расстояние от дна ковша, м; fi – угол нахождения расчетного сечения относительно вертикального сечения ковша, проходящего через ось фурмы (180-270), град, см. рис. 1, б) при на-

хождении фильтрующей перегородки на $\frac{1}{2}$ высоты налива металла.

Так, найденные нами регрессионные зависимости имеют вид (m - садка ковша, t ; R - коэффициент множественной корреляции, все коэффициенты статистически значимы):

- для 8-т ковша:

$$W=0,080099+0,000794 \cdot i+0,315301 \cdot r+0,367091 \cdot r^2-0,000104 \cdot fi-0,048132 \cdot h+0,046063 \cdot h^2, R=0,72; \quad (1)$$

- для 16-т ковша:

$$W=0,073918+0,000791 \cdot i+0,237263 \cdot r+0,222983 \cdot r^2-0,000065 \cdot fi-0,054908 \cdot h+0,037574 \cdot h^2, R=0,72; \quad (2)$$

- для 30-т ковша:

$$W=0,063124+0,002158 \cdot i+0,181140 \cdot r+0,136731 \cdot r^2-0,000048 \cdot fi-0,038425 \cdot h+0,026788 \cdot h^2, R=0,74; \quad (3)$$

- для исследованных ковшей:

$$W=0,053032-0,000196 \cdot m+0,001708 \cdot i+0,152132 \cdot r+0,106456 \cdot r^2-0,000022 \cdot fi-0,031234 \cdot h+0,024045 \cdot h^2, R=0,69. \quad (4)$$

Пользуясь уравнениями (1)–(4) и задавшись координатами интересующего места ввода дополнительных материалов, можно с достаточной степенью достоверности определить скорости обтекающих их потоков жидкого металла, а следовательно, рассчитать длительность усвоения добавок и, соответственно, требуемую массовую скорость их ввода.

Из (1)–(4) видно, что, по мере роста интенсивности продувки, средние скорости жидкости увеличиваются. Также прослеживается закономерность увеличения W при уменьшении вместимости ковша, что предполагает возможность снижения интенсивности подачи газа в малых литейных ковшах при получении той же мощности перемешивания.

Для наилучшего усвоения дополнительных материалов, вводимых в литейный ковш, следует определить место расположения в объеме металла локальных областей с наибольшими абсолютными значениями скоростей потоков жидкого металла. Также немаловажно знать и расположение застойных зон, а которые крайне нежелательно вводить реагенты. С этой целью следует решить задачу оптимизации.

Генетические и эволюционные алгоритмы оптимизации являются алгоритмами случайно-направленного поиска и применяются, в основном, там, где стоит задача оптимизации недифференцируемой функции или задача многоэкстремальной глобальной оптимизации [17, 18], что и является особенностью данных исследований.

Результаты расчета местоположения глобальных экстремумов скоростей потоков металла в расчетной области исследованных литейных ковшей, продуваемых снизу инертным газом с заданной интенсивностью и оборудованных фильтрующей перегородкой, представлены в таблице.

Следует подчеркнуть, что, при всей схожести результатов расчетов, значения глобальных экстре-

мов скоростей потоков металла и расположение их в объеме литейных ковшей исследуемой конструкции при численных расчетах плавления дополнительно вводимых реагентов следует определять для каждого конкретного случая.

Таблица. Расположение в объеме литейных ковшей локальных точек с глобальными экстремальными значениями скоростей потоков металла

m, t	Интенсивность продувки, л/(т·мин)	$W, m/c$	r, m	$fi, град$	h, m
8	1,2	-0,027	-0,43	90 (270)	0,52
		0,078	0	180	1,30
	2,2	-0,027	-0,43	90 (270)	0,52
		0,078	0	180	1,30
	3,2	-0,026	-0,43	90 (270)	0,52
		0,079	0	180	1,30
16	1,2	-0,026	-0,53	90 (270)	0,73
		0,075	0	180	1,65
	2,2	-0,025	-0,53	90 (270)	0,73
		0,076	0	180	1,65
	3,2	-0,024	-0,53	90 (270)	0,73
		0,076	0	180	1,65
30	1,2	-0,021	-0,66	90 (270)	0,72
		0,070	0	180	1,72
	2,2	-0,019	-0,66	90 (270)	0,72
		0,072	0	180	1,72
	3,2	-0,017	-0,66	90 (270)	0,72
		0,075	0	180	1,72

Выводы

С использованием разработанной адекватной сопряженной трехмерной математической модели тепло- и массопереноса в объеме жидкого металла, продуваемого снизу в полости литейных ковшей инертным газом, оборудованных фильтрующей перегородкой, а также на основании решения оптимизационной задачи:

1. Получены сравнительные качественные и количественные характеристики движения гидродинамических потоков расплава при продувке газом металла в литейных ковшах, снабженных фильтрующей перегородкой.
2. Найдено, что фильтрующую перегородку целесообразно выполнять в виде половины горизонтального сечения ковша над продувочным узлом на расстоянии половины высоты налива металла в ковше.
3. Установлено, что интенсивность подачи газа по мере уменьшения садки ковша может быть уменьшена при сохранении той же мощности перемешивания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вихлевщук В. А. Математическая модель гидродинамики расплава в заполняемом сталеразливочном ковше с учетом донной продувки металла аргоном / В. А. Вихлевщук, Ю. Н. Омесь, С. Е. Самохвалов и др. // Математичне моделювання. — 1998. — № 3. — С. 75—79.

2. Пиптюк В. П. Исследование гидродинамики и тепло-, массообмена ковшевой ванны установки ковш-печь / В. П. Пиптюк, В. Ю. Болотов, И. А. Павлюченков // *Металл и литье Украины*. — 2005. — № 3—4. — С. 97—98.
3. Пиптюк В. П. Исследования тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш-печь. Ч. 1. Математическая модель / В. П. Пиптюк, С. Е. Самохвалов, И. А. Павлюченков и др. // *Теория и практика металлургии*. — 2008. — № 3. — С. 3—5.
4. Смирнов А. Н. Физическое моделирование процессов перемешивания металлов в ковше / А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш и др. // *Металл и литье Украины*. — 2006. — № 3—4. — С. 27—30.
5. Смирнов А. Н. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 1 / А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш и др. // *Процессы литья*. — 2008. — № 4. — С. 41—48.
6. Смирнов А. Н. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 2 / А. Н. Смирнов, Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш и др. // *Процессы литья*. — 2008. — № 5. — С. 30—35.
7. Смирнов А. Н. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 3 / А. Н. Смирнов, В. М. Сафонов, Е. В. Ошовская и др. // *Процессы литья*. — 2009. — № 5. — С. 11—19.
8. 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.
9. Штапура Е. В. Моделирование продувки жидкой стали в ковше нейтральным газом. / Е. В. Штапура, Ю. И. Жаворонков, Б. М. Бойченко и др. // *Новости науки Приднепровья*. — 2008. — № 1. — С. 112—114.
10. Еронько С. П. 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.
11. Еронько С. П. Модельные исследования гидродинамики процессов перемешивания стали в ковшах малой вместимости / С. П. Еронько, А. Н. Смирнов, И. Н. Салмаш и др. // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. — 2004. — № 8. — С. 123—126.
12. Цупрун А. Ю. Исследование гидродинамических процессов в ковшах малой вместимости при различных способах перемешивания стали / А. Ю. Цупрун, Е. В. Штепан, О. В. Антыкуз и др. // *Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет». Наукові праці. «Металургія»*. — 2008. Випуск 10 (14). — С. 20—24.
13. 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.
14. Гресс А. В. Физическое моделирование гидродинамики металлической ванны литейного ковша / А. В. Гресс, С. А. Стороженко // *36. наук. пр., сер. «Металургія»*. — Запоріжжя : ЗДІА. — 2011. — Вип. 24. — С. 19—24.
15. Гресс А. В. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики и теплопереноса в литейном ковше / А. В. Гресс, С. Е. Самохвалов, С. А. Стороженко и др. // *Математичне моделювання*. — 2011. — № 2 (25). — С. 119—122.
16. Гресс А. В. Оптимизация пространственных координат точек ввода дополнительных материалов в литейные ковши / А. В. Гресс, С. А. Стороженко // *Математичне моделювання*. — 2012. — № 2(27). — С. 42—47.
17. Популярно о генетических алгоритмах. Исаев Сергей. Электронный ресурс. Режим доступа : <http://algotlist.manual.ru/ai/ga/ga1.php>.
18. 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/memo314.shtml>.