

10. Гольдштейн М.И. Специальные стали / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер. – М. : Metallurgiya, 1985. – 408 с.
11. Свидуневич Н.А. Взаимодействие компонентов в сплавах / Н.А. Свидуневич, В.П. Глыбин, Л.К. Сvirko. – М. : Metallurgiya, 1989. – 158 с.

Bibliography:

1. Liquid steel / B.A. Baum [and others]. – Moscow : Metallurgiya, 1991. – 158 p. (Rus.)
2. Skrebtsov A.M. Liquid metals, their properties and structure / A.M. Skrebtsov. – Mariupol : PSTU, 2010. – 252 p. (Rus.)
3. Taran J.N. Effect thermo-speed processing liquid alloy castings AL2 on property / J.N. Taran, I.A. Novokhatsky, V.I. Mazur // Foundry. – 1985. – №7. – P. 8. (Rus.)
4. Effect of heating temperature of molten aluminum alloy microstructure solidified metal / A.M. Skrebtsov, G.A. Ivanov, Y.D. Kuzmin, A.S. Kachikov, E.V. Zolotareva // Reporter of the priazovskyi state technical university. Section Technical sciences: collection of scientific works. – Mariupol, 2011. – Issue 23. – P. 138-142. (Rus.)
5. Kramarov A.V. Production of steel in electric furnaces / A.V. Kramarov. – М. : Metallurgiya, 1969. – 440 p. (Rus.)
6. Gulyaev A.P. Metallography. – М. : Metallurgiya, – 1986. – 542 p. (Rus.)
7. Miroschnichenko I.S. Quenching from the liquid state. – М. : Metallurgiya, 1982. – 168 с. (Rus.)
8. Influence of the cooling rate on the restructuring of metal melt / A.M. Skrebtsov, G.A. Ivanov, Yu.D. Kusmin, E.G. Bozkova // Steel in Translation. – Vol. 39. – №1. – 2009 – PP. 1-3.
9. Yatsenko A.I. The primary structure of peritectic steels / A.I. Yatsenko, N.I. Repin, P.D. Grishko // Metallurgy and heat treatment of metals. – 1988. – №1. – P. 9-11. (Rus.)
10. Goldstein M.I. Special steel / M.I. Goldstein, S.V. Grachev, Y.G. Wexler. – М. : Metallurgy, 1985. – 408 p. (Rus.)
11. Svidunovich N.A. Interaction of the components in the alloys / N.A. Svidunovich, V.P. Glybina, L.K. Svirko. – М. : Metallurgiya, 1989. – 158 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 29.10.2014

УДК 669.184.244

© Сущенко А.В.¹, Чернятевич А.Г.², Гриценко А.С.³

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ
ФУРМЕННЫХ НАКОНЕЧНИКОВ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ
РАСПОЛОЖЕНИЕМ СОПЕЛ**

Выполнено численное моделирование течения охлаждающей воды в фурменных наконечниках с тангенциальным расположением сопел для цельноточеной, литой и сварной конструкций. Предложены технические решения, направленные на повышение технологичности изготовления, а также стойкости и надежности работы головок кислородных фурм с тангенциальным расположением сопел сварной конструкции.

Ключевые слова: конвертер, кислородная фурма, наконечник, система охлаждения, гидродинамика, численное моделирование, сварные швы, конструкция сопел, технологичность изготовления, повышение стойкости.

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Sushchenko.andrei@gmail.com

² д-р техн. наук, профессор, Институт черной металлургии НАН Украины, г. Днепропетровск, agchern@ua.fm

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Gritsenko.a.s@mail.ru

Сущенко А.В., Чернятевич А.Г., Гриценко О.С. Підвищення стійкості та надійності роботи фурменних наконечників зварної конструкції з тангенціальним розташуванням сопел. Виконано численне моделювання течії охолоджувальної води у фурменних наконечниках з тангенціальним розташуванням сопел для суцільноточеної, литої та зварної конструкції. Запропоновані технічні рішення, що направлені на підвищення технологічності виготовлення, а також стійкості та надійності роботи головок кисневих фурм з тангенціальним розташуванням сопел зварної конструкції.

Ключові слова: конвертер, киснева фурма, наконечник, система охолодження, гідродинаміка, чисельне моделювання, зварювальні шви, конструкція сопел, технологічність виготовлення, підвищення стійкості.

A.V. Sushchenko, A.G. Chernyatevich, A.S. Gritchenko. Increase of duration and reliability of lance tips with tangential location of nozzles. Numeric modeling of cooling water stream in lance tips with tangentially located nozzles whole, one piece chiseled, cast and weld structure are completed. It is shown that for a uniform tips nozzles tangential arrangement does not significantly complicate the design, and improves the oxygen tip cooling. Water channels, at the same time, also rationally make tangentially. For tips with separate nozzles, placing recent by double angle to the axis of the lance leads to additional overlapping sectional area for cooling water passage and structure of its flow deterioration in the tips. Depending on the size of the trunk and tip design features water pressure losses therein may be increased to two times or more. To improve the water flow organization and maintain the set pressure losses and the water flowing between nozzles proportion in the tips with tangential nozzles, optimization water separator needed. The holes therein for flowing water behind the nozzles efficiently performing with a crescent or oval shape with an angular shift to the second angle nozzle inclination. Welded lance tip with double angle nozzles are designed, wherein through outer and inner surfaces nozzle optimum shape improves its and tip generally manufacture adaptability, increasing connections nozzles with plates strength and ratability, provides at the same time: relatively low water pressure losses in the tip and a high enough proportion of its flow through center tip area, and reduces the probability of separated flows in the nozzles outlet pipe at variable oxygen flow through the lance.

Keywords: converter, oxygen lance, tip, cooling system, hydrodynamics, numerical simulation, welds, nozzles design, making manufacturability, capability increasing.

Постановка проблеми. Усилившися в последнее время тенденции в нестабильности снабжения металлургических предприятий сырьем и энергоносителями, увеличение длительности кампаний по футеровке конвертеров, а также необходимость развития новых технологий (с использованием первородного сырья, организации дожигания газов в агрегате и др.) требуют расширения возможностей в управлении конвертерной плавкой, в т. ч. за счет совершенствования конструкций кислородных фурм. Так, при переделе низкомарганцовистых чугунов, работе по малошлаковым технологиям, необходимости увеличения интенсивности кислородной продувки плавок (при неизменных размерах агрегата) и т. п. часто возникает потребность в дополнительном «умягчении» дутьевого режима плавок. В большинстве случаев на практике для решения указанной задачи прибегают к увеличению числа сопел или угла их наклона к оси фурмы. Возможности указанных вариантов ограничиваются снижением стойкости медных головок и футеровки конвертера, а также ухудшением управляемости процесса посредством изменения режимных параметров дутья. Одним из эффективных (с технологической точки зрения) вариантов решения является использование фурм с тангенциально расположенными соплами (размещенными под двойным углом наклона к оси фурмы) [1]. Несмотря на имеющиеся технологические преимущества указанных фурм, они до настоящего времени на практике не получили широкого распространения, что во многом определяется как усложнением изготовления отдельных узлов и сборки головок, так и недостаточной их стойкостью и надежностью, особенно для сварных конструкций.

Анализ последних исследований и публикаций. Относительно* высокие показатели стойкости водоохлаждаемых фурменных наконечников с тангенциальным расположением сопел были достигнуты при использовании головок литой и цельноточеной конструкций на конвертерах емкостью до 200 т (с наружным диаметром фурмы до $D_n \sim 219$ мм) [2]. При этом расположение сопел под двойным углом к оси фурмы не вызывает существенных усложнений в изготовлении головки. На крупнотоннажных конвертерах ($D_n \sim 426$ мм) указанные конструкции наконечников редко используются из-за трудности обеспечения необходимой прочности головки - для литой, а также сложности организации надежного охлаждения центральной части наконечника и большого расхода меди – для цельноточеной конструкции. Для фурм крупнотоннажных конвертеров наиболее широкое распространение получили наконечники сварной конструкции, в которой сопла изготавливаются отдельными деталями и затем соединяются в процессе сборки с верхней и нижней тарелками головки фурмы. При этом реализация тангенциального расположения сопел существенно усложняет изготовление указанных мест соединения и соответствующих сварных швов: механическая обработка торцов и буртов сопел, а также сварных фасок в тарелках выполняется по сложной линии пересечения сферических тарелок и конических наружных поверхностей сопел, оси которых не проходят через центры соответствующих сфер. Упрощенное изготовление указанных узлов и соединений исключает качественное выполнение сварных швов, вследствие чего существенно снижается их прочность и стойкость, а также стойкость наконечника в целом.

Попытки выполнить соединения (в т.ч. сварные) нижней тарелки с продувочными соплами, нижняя часть наружной поверхности которых, выполнена в виде подвижных и неподвижных шарнирных узлов [3, 4 и др.] не привели к положительному результату.

Известно техническое решение для фурмы сварной конструкции [5], согласно которому оси участков внешней поверхности каждого тангенциально расположенного сопла выполняются нормально касательным плоскостям к поверхностям верхней и нижней тарелок в точках пересечения осей этих участков с поверхностями тарелок. Однако в указанном техническом решении не определена оптимальная форма наружной поверхности сопел, в т.ч. не определено и количество её участков.

Следует отметить, что при расположении сопел под двойным углом наклона к оси фурмы (со сферическими или другими применяемыми формами тарелок) выходной участок сопла выполняют с косым срезом, что существенно изменяет число Маха и, при переменных режимах работы (уменьшении расхода кислорода), может привести к более раннему появлению отрывных течений на выходном участке сопла. При этом существенно увеличивается скорость эрозийного износа сопел, изменяются параметры истечения кислородных струй, и, как следствие, снижается стойкость наконечника и дестабилизируется дутьевой режим плавки.

При проектировании фурменных наконечников различных конструкций с тангенциальным расположением сопел необходимо также учитывать влияние величины второго угла наклона сопел на гидродинамику течения воды в головке и качество ее охлаждения. Авторами [6-8] была разработана методика и выполнены численные исследования эффективности работы систем охлаждения наконечников различных конструкций (цельноточеной, ковано-паяной, литой и сварной) с радиальным расположением сопел. Для случая их тангенциального расположения такие исследования отсутствуют.

Цель статьи – анализ влияния двойного угла наклона сопел на качество охлаждения головок фурм различных конструкций, а также разработка фурменного наконечника сварной конструкции с тангенциальным расположением сопел, обеспечивающей одновременно высокие технологичность изготовления, стойкость и надежность его работы.

Изложение основного материала. Моделирование гидродинамики течения охлаждающей воды в головках фурм выполнялось с использованием программного пакета FlowVision (ООО «Тесис», РФ) по разработанной выше методике [6]. Получено, что для фурм с отдельно расположенными соплами (литые, сварные, ковано-паяные конструкции наконечников), наличие второго угла их наклона к оси фурмы приводит к дополнительному перекрытию площади проходного сечения (за счет увеличения, как длины сопла, так и приведенного диаметра его наружной поверхности), ухудшению структуры течения и повышению потерь давления воды в

* По сравнению с аналогичными конструкциями с радиальным расположением сопел

головке фурмы. При отсутствии запаса мощности водяных насосов это может вызвать снижение расхода воды через фурму и, как следствие, стойкости наконечника. Для фурм с центральной подачей кислорода тангенциальное расположение сопел приводит, при прочих равных условиях, также к снижению скорости движения охладителя в межсопловом пространстве – вблизи наиболее теплонапряженной центральной области нижней тарелки головки. Указанные влияния особо ощутимы на фурмах малых диаметров и с наконечниками литой конструкции с толстостенными соплами. Для таких фурм с упрощенной конструкцией разделителя воды (концевой участок промежуточной трубы) потери давления воды в наконечнике увеличиваются с 0,03 – 0,05 до 0,08 – 0,15 МПа.

В цельноточеных наконечниках двойной угол наклона сопел увеличивает их длину и повышает степень охлаждения головки кислородом. В таких наконечниках водяные каналы также целесообразно располагать тангенциально. При незначительном увеличении потерь давления воды это позволяет увеличить эффективную поверхность теплообмена. Также увеличивается минимальное расстояние между кислородными и водяными каналами, что особенно важно для наконечников с большим количеством сопел. Рекомендации по разработке головок таких конструкций изложены в работе [9].

Для фурм крупнотоннажных конвертеров с наконечниками сварной конструкции величина приращения потерь давления воды в головке (при изменении расположения сопел с радиального на тангенциальное) существенно зависит от количества сопел и диаметра фурмы. Без учета необходимости выполнения сварных буртов на соплах, увеличение потерь давления составляет 20 – 60 %. При выполнении буртов, обеспечивающих прочное сварное соединение между соплами и нижней тарелкой, имеет место существенное увеличение наружного диаметра нижней части сопла, что вызывает дополнительное повышение давления воды в головке. В зависимости от формы наружной поверхности сопла потери давления могут возрасти в 2 раза и более, при одновременном увеличении размеров вихревых засопловых зон.

Для снижения потерь давления в наконечнике и улучшения охлаждения засопловых зон (за счет разрушения локальных вихревых течений) рационально использовать разделители охлаждающей воды с отверстиями для перетока её части в засопловые зоны [10, 11]. При этом, для фурм с двойным углом наклона сопел сложность вызывает определение оптимальных размеров отверстий под сопла. Необходимо, чтобы зазор между разделителем и соплами был минимален, а вода перетекала, по возможности, только в межсопловом пространстве и через специальные отверстия в разделителе в засопловые зоны. На рис. 1 приведены результаты моделирования гидродинамики течения охлаждающей воды в пятисопловых наконечниках сварной конструкции с радиальным и тангенциальным расположением сопел при следующих условиях: диаметры наружной, промежуточной и центральной труб фурмы 350-т конвертера соответственно равны 426×12 , 377×10 и 273×10 мм; расход охлаждающей воды через фурму – 450 м³/час; отверстия в разделителе для перетока части воды в засопловые зоны имеют форму полукруга. Расположение сопел под двойным углом ($\alpha = 15^\circ$; $\beta = 15^\circ$) привело к увеличению потерь давления с 0,05 – 0,08 МПа до 0,13 – 0,15 МПа, и снижению доли воды перетекающей в межсопловом пространстве с 80 % до 40%. Сбоку тангенциально расположенного сопла образуется локальная замкнутая зона высокоскоростного ($W_{\text{воды}} = 4 - 5$ м/с) вихревого течения (цифра 2 на рис. 1 б), в то время как по обоим бокам радиально расположенного сопла имеет место «проточное» движение воды (со скоростью $W_{\text{воды}} \sim 3$ м/с, цифра 1). Для разрушения локальных вихревых зон потоками воды, перетекающими через отверстия в разделителе, форма последних для наконечников с тангенциально расположенными соплами должна быть более сложной: в виде овала или полумесяца с соответствующим угловым смещением в сторону второго угла наклона сопла. При этом площадь указанных отверстий должна быть оптимальной – достаточной для разрушения локальных вихревых зон, при одновременном обеспечении протока основной части воды через центральную область головки ($\varphi_{\text{ц}}$, %). За счет оптимизации формы отверстий в разделителе потери давления воды в наконечнике снижаются до 0,10 МПа (при величине $\varphi_{\text{ц}} \sim 40 - 45$ %).

Одним из способов снижения потерь давления и улучшения структуры течения воды в наконечнике с тангенциальным расположением сопел является оптимизация формы их наруж-

ной поверхности. В соответствии с разработанным техническим решением внешняя поверхность сопла выполняется с пятью участками: основным (с минимальным наружным диаметром), входным и выходным (обеспечивающими простые и надежные сварные соединения сопел с тарелками), верхним и нижним переходными (сопрягающими поверхности основного с входным и выходным участками соответственно). Все участки имеют форму тел вращения, что повышает технологичность изготовления и позволяет их выполнить без применения специально-дорогостоящего механообрабатывающего оборудования. Внешний вид (аксонометрия) и разрез сопла предлагаемой конструкции приведены на рис. 2, а на рис. 3 приведены результаты моделирования движения воды в фурменном наконечнике разработанной конструкции.

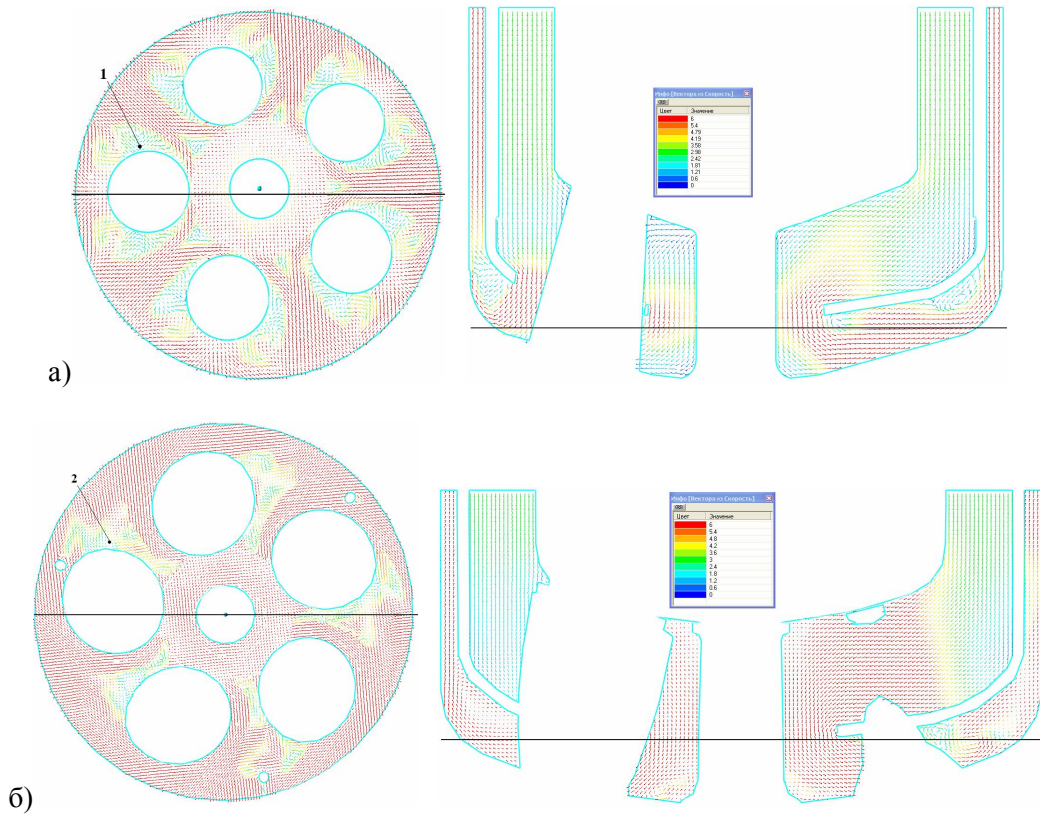


Рис. 1 – Результаты моделирования гидродинамики течения охлаждающей воды в наконечнике фурмы сварной конструкции фурмы 350-т конвертера с радиально (а), и тангенциально (б) расположенными соплами. Линиями показаны плоскости, по которым выполнены разрезы пространственного поля векторов скоростей (цифры - см. в тексте)

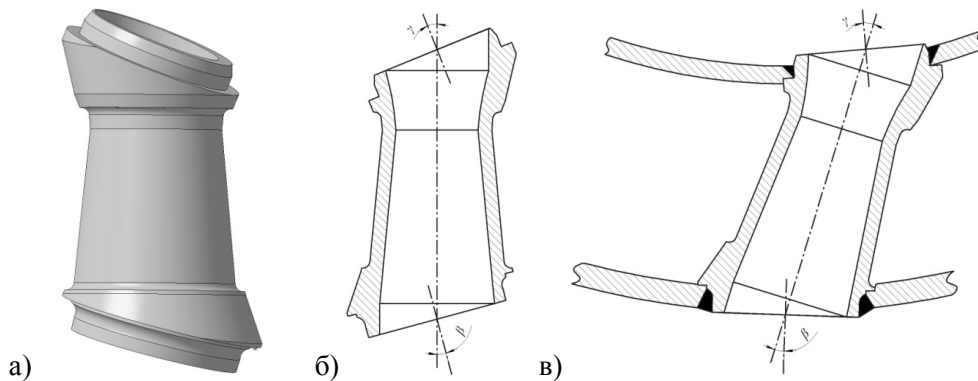


Рис. 2 – Внешний вид (а) и сечение (б) тангенциально расположенного сопла новой конструкции, а также и разрезы мест его соединения с тарелками головки фурмы (в)

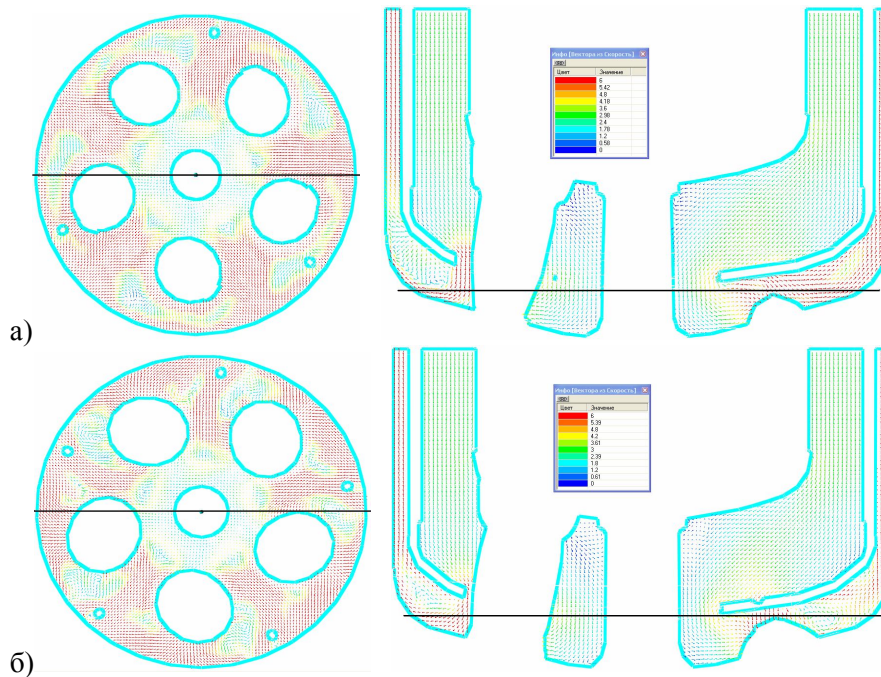


Рис. 3 – Результати моделювання гідродинаміки течення охолоджуючої води в наконечнику сварної конструкції фурми 350-т конвертера з соплами нової конструкції, полукруглими (а) і овальними (б) отвeрстиями в разделителе воды

Выводы

1. Для наконечников с цельным сопловым блоком (например, цельноточеных) тангенциальное расположение сопел не приводит к существенному усложнению конструкции, улучшает охлаждение головки кислородом. Водяные каналы при этом рационально также располагать тангенциально.

2. Для наконечников с отдельно расположенными соплами (литой, сварной, ковчано-паяной и др. конструкции), размещение последних под двойным углом наклона к оси фурмы (по сравнению с радиальным), приводит к дополнительному перекрытию площади сечения для прохода охлаждающей воды и ухудшению структуры ее течения в головке. В зависимости от размера ствола и конструктивных особенностей наконечника потери давления воды в нем могут возрасти в 2 и более раз.

3. В наконечниках с тангенциальным расположением сопел, для улучшения организации течения воды (в т. ч. разрушения замкнутых присопловых вихревых зон), а также обеспечения заданных потерь давления и доли воды, перетекающей в межсопловом пространстве, необходимо оптимизировать форму разделителя воды. При этом отверстия в нем для перетока воды в засопловые зоны рационально выполнять с формой овала или полумесяца с угловым сдвигом в сторону второго угла наклона сопла.

4. Разработан фурменный наконечник сварной конструкции с двойным углом наклона сопел, в котором за счет оптимальной формы наружной и внутренней поверхностей сопел улучшается технологичность их изготовления и наконечника в целом, увеличивается прочность и надежность узлов соединения сопел с тарелками, обеспечиваются одновременно: относительно низкие потери давления воды в головке и достаточно высокая доля её перетока через межсопловую область головки, а также уменьшается вероятность появления отрывных течений на выходных участках сопел при переменных расходах кислорода через фурму.

5. Для разработки оптимальных режимов продувки конвертерной плавки с использованием кислородных фурм с тангенциально расположенными соплами в дальнейшем планируется выполнить численное моделирование процессов истечения, распространения и взаимодействия с металлической ванной кислородных струй с двойным углом наклона.

В работе принимал участие Фейерэizen И.А.

Список использованных источников:

1. Сущенко А.В. Совершенствование и оптимизация дутьевых режимов и устройств кислородных конвертеров в современных условиях / А.В. Сущенко, А.Г. Чернятевич // Материалы VIII международной научно-технической конференции «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах» 7-9 сентября 2010 г. – Мариуполь. – С. 245-262.
2. Казаков А.А. Эффективность использования конвертерных фурм с двойным углом наклона сопел / А.А. Казаков [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1986. – № 1. – С. 17-18.
3. А. с. 383737 СССР, МПК С 21 С 5/48. Фурма для продувки металла.
4. А. с. 430161 СССР, МПК С 21 С 5/48. Фурма для продувки металла.
5. Пат. 66827 Украина, МПК С 21 С 5/48. Наконечник кислородной фурмы.
6. Сущенко А.В. Моделирование тепловой работы наконечников кислородных фурм для верхней продувки конвертеров / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2010. – № 3. – С. 53-58.
7. Сущенко А.В. Анализ эффективности систем охлаждения наконечников фурм кислородных конвертеров. Сообщение 1 / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2009. – № 1. – С. 6-9.
8. Сущенко А.В. Анализ эффективности систем охлаждения наконечников фурм кислородных конвертеров. Сообщение 2 / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 2009. – № 3. – С. 9-12.
9. Сущенко А.В. Тепловая и гидродинамическая работа наконечников кислородных фурм с цельным сопловым блоком / А.В. Сущенко, А.П. Балаба // Тепло-массообменные процессы в металлургических системах: Материалы VIII-ой междунауч.-техн. конф. – Мариуполь: ПГТУ, 2010. – С. 257-263.
10. Пат. 10513 Украина, МПК С 21 С 5/48. Багатосопловий наконечник фурми.
11. Пат. 10514 Украина, МПК С 21 С 5/48. Фурма для верхнього продування сталеплавильної ванни.

Bibliography:

1. Sushchenko A.V. Improvement and optimization of the blow modes and devices BOF in modern conditions / A.V. Sushchenko, A.G. Chernyatevich // Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference "Heat and mass transfer processes in the metallurgical systems" 7-9 September 2010. – Mariupol. – P. 245-262. (Rus.)
2. Kazakov A.A. BOF lances with double angle nozzles use efficiency // A.A. Kazakov [and other] // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promishlennost. – 1986. – № 1. – P. 17-18. (Rus.)
3. Inventor's certificate 383737 SU, IPC C 21 C 5/48. Lance for blowing metal. (Rus.)
4. Inventor's certificate 430161 SU, IPC C 21 C 5/48. Lance for blowing metal. (Rus.)
5. Pat. 66827 Ukraine, IPC C 21 C 5/48. Oxygen lance tip. (Ukr.)
6. Sushchenko A.V. Oxygen top blowing lance tips thermal performance modeling / A.V. Sushchenko, A.P. Balaba // Izvestia VUZov. Chernaya metallurgia. – 2010. – № 3. – P. 53-58. (Rus.)
7. Sushchenko A.V. BOF lance tips cooling system efficiency analysis. Message 1 / A.V. Sushchenko, A.P. Balaba // Izvestia VUZov. Chernaya metallurgia. – 2009. – № 1. – P. 6-9. (Rus.)
8. Sushchenko A.V. BOF lance tips cooling system efficiency analysis. Message 2 / A.V. Sushchenko, A.P. Balaba // Izvestia VUZov. Chernaya metallurgia. – 2009. – № 3. – P. 9-12. (Rus.)
9. Sushchenko A.V. Oxygen lance with whole chiseled tips thermal and hydrodynamic work / A.V. Sushchenko, A.P. Balaba // Тепло-массообменные процессы в металлургических системах: Материалы VIII международной техн. конференции. – Мариуполь: PSTU, 2010. – P. 257-263. (Rus.)
10. Pat. 10513 Ukraine, IPC C 21 C 5/48. Multi nozzles lance tip. (Ukr.)
11. Pat. 10514 Ukraine, IPC C 21 C 5/48. Steelmaking bath top blowing lance. (Ukr.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.08.2014