СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ГОЛОВОК ВЕРХНИХ ФУРМ 250-ТОННЫХ КОНВЕРТЕРОВ*

С. П. ПАНТЕЙКОВ¹, канд. техн. наук, доцент кафедры металлургии черных металлов, *ser_pant_in@ukr.net*;
Л. М. УЧИТЕЛЬ², помощник генерального директора; В. В. ИВКО², директор по производству и поставкам
продукции; Ю. И. ХАРЧЕНКО², начальник механического цеха; Ю. П. МАХЛАЙ², начальник конвертерного
цеха; В. Г. МАЗАЙ², заместитель начальника конвертерного цеха по энергетике

(¹ Днепропетровский государственный технический университет, Украина,
Днепропетровская обл., г. Каменское; ² ПАО “Днепропетровский металлургический комбинат”, Украина,
Днепропетровская обл., г. Каменское)

Аннотация. Ухудшение охлаждения наконечников в результате увеличения числа сопел в фурменных головках не позволяет использовать в конвертерных цехах для повышения технико-экономических показателей процесса выплавки стали и эксплуатационных характеристик технологического оборудования многосопловые (от шести и выше) верхние дутьевые устройства, так как это приводит к перегреву и прогару материала наконечников в засопловых зонах и, как следствие, выходу из строя верхних фурм. С целью устранения застойных зон воды в засопловых зонах охлаждающего тракта головок верхних кислородных фурм 250-т конвертеров и повышения их стойкости впервые была разработана, изготовлена и опробована новая конструкция шестисопловой фурменной головки с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства наконечников. Усовершенствование системы охлаждения шестисопловых головок предусматривало асимметричную (относительно боковой поверхности соплового блока) установку за каждым соплом (по ходу движения воды) по одной направляющей лопасти специальной конструкции. Это позволило в максимальной степени повысить эффективность теплосъема с внутренней поверхности в засопловых зонах наконечника и положительно сказалось на стойкости головок верхних дутьевых устройств. Работоспособность предложенной конструкции шестисопловой фурменной головки с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства установлена в ходе кампании опытно-промышленных плавов на 250-т конвертерах ОАО “Днепропетровский металлургический комбинат” при расходах кислорода 800–1200 м³/мин в режиме частичного дожигания отходящих газов. Расход воды на охлаждение фурм снизился с 320–340 до 300 м³/ч, при этом разность температур воды на входе и выходе из фурмы колебалась в пределах 11–16 °С в зависимости от времени продувки. Применение новой конструкции шестисопловой фурменной головки с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства позволило за счет более рационального распределения охладителя и увеличения его скорости повысить стойкость шестисопловых головок в 1,287 раза по сравнению с аналогичными конструкциями шестисопловых головок без охлаждения зон засоплового пространства и в 3,327 раза по сравнению с пятисопловыми штатными фурменными головками. Снизилась степень заматывания стволов шестисопловых фурм с головками, имеющими асимметричное охлаждение зон засоплового пространства наконечника: шестисопловые фурмы снимались на обрезку настывшей после 79–81-й плавки, в то время как пятисопловые дутьевые устройства — после 1–5-й плавки, что свидетельствует о большей эффективности дутьевого и шлакового режимов ведения плавки с применением предложенной конструкции шестисопловой фурмы с асимметричным охлаждением засопловых зон.

Ключевые слова: кислородный конвертер, многосопловая верхняя фурма, дутьевое устройство, продувочное сопло, степень заматывания, асимметричное охлаждение зон засоплового пространства, стойкость фурменных головок.

Ссылка для цитирования. Пантейков С.П., Учитель Л.М., Ивко В.В., Харченко Ю.И., Махлай Ю.П., Мазай В.Г. Совершенствование системы охлаждения головок верхних фурм 250-тонных конвертеров // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75. № 3. С. 327–336.

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-3-327-336

* В изготовлении фурменных головок и сборке верхних фурм принимали участие сотрудники ОАО ДМКД А.П. Жидков, О.Г. Усенко, В.Е. Олиар, Д.В. Сидорин, Л.В. Кадацкий, В.М. Белошевский, А.Н. Соколов, Т.И. Лосева, В.В. Женилов, А.С. Галаганов, в разработке рабочих чертежей и обработке результатов конвертерных плавов — студенты магистратуры ДГТУ А.Н. Хрисанфов и Ю.А. Чаленко.

PERFECTION OF COOLING SYSTEM OF OVERHEAD TUYERES HEADS OF 250-t BOFs

S. P. PANTEIKOV¹, PhD (Tech), Prof. Ass., Dpt "Metallurgy of ferrous metals", ser_pant_in@ukr.net;
L. M. UCHITEL'², Ass. of General director; V. V. IVKO², Production and Products Supplies director;
YU. I. KHARCHENKO², Head of mechanical shop; YU. P. MAKHLAI², Head of BOF shop;
V. G. MAZAI², deputy Head of BOF shop on energy
(¹ Dneprovsky State Technical University, Ukraine, Dnepropetrovsk rgn., Kamenskoe;
² PAO "Dneprovsky steel-works, Ukraine, Dnepropetrovsk rgn., Kamenskoe)

Abstract. Deterioration of tips cooling as a result of number of nuzzles increase in tuyere heads does not allow to use multi-nozzle (six and more) overhead tuyeres for increasing of steel melting technical and economical indices and operating characteristics of technological equipment. The main reason of it is as follows: deterioration of cooling results in over-heating and burnt-out of tips material in the farthest nozzle zone following the overhead tuyeres breakage. To avoid the water stagnant areas in the farthest nozzle zones of the heads cooling route and therefore to increase the overheads oxygen tuyeres of 250-t BOF operation life, a new design of the six-nozzle tuyere head with asymmetric cooling of tips farthest zones elaborated, manufactures and tested. The perfection of the six-nozzle heads cooling system included asymmetric (relating the side surface of the nozzle block) installation behind every nozzle (in the water direction) a guiding blade of special design. It enabled to increase to a maximum degree the heat removal efficiency from the internal surface in the tip farthest zones and had a positive effect on the overhead tuyeres heads resistance. The workability of the proposed design of the six-nozzle tuyere head with asymmetric cooling of farthest zones was confirmed during test-industrial heats at 250-t BOFs of OJSC "Dneprovsky steel-works". The heats were carried out with oxygen consumption of 800–1200 m³/min and regime of partial afterburning of exit gases. The water consumption for tuyeres cooling decrease from 320–340 m³/h, at that the water temperature difference at the tuyere entry and exit varied in the range of 11–16 °C depending on blow-down duration. Application of the new design of the six-nozzle tuyere head with asymmetric farthest zones cooling enabled to increase the six-nozzle heads resistance by a factor 1.287 comparing with six-nozzle heads without farthest zones cooling and by a factor of 3.327 comparing with regular five-nozzle tuyere heads. The effect reached thanks to more rational cooler distribution and increase of its velocity. The metal pick up of shafts of the six-nozzle tuyere head with asymmetric farthest zones cooling: while the five-nozzle tuyeres were taken off for salamander cutting off after 1–5 heats, the six-nozzle tuyeres were taken off for the salamander cutting off after 79–81 heats. It indicated a higher efficiency of heat running blow-down and slag regimes with application of proposed design of the six-nozzle tuyere head with asymmetric farthest zones cooling.

Key words: basic oxygen furnace, multi-nozzle overhead tuyere, blow-down unit, blow-down nozzle, metal pick up degree, asymmetric farthest zones cooling, tuyere heads resistance.

For citation. Panteikov S.P., Uchitel' L.M., Ivko V.V., Kharchenko Yu.I., Makhlai Yu.P., Mazai V.G. Perfection of cooling systems of overhead tuyeres heads of 250-t BOFs. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii* = *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 3, pp. 327–336. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2019-3-327-336

Известно [1–3], что с целью повышения технико-экономических показателей работы конвертерного цеха и эксплуатационных характеристик технологического оборудования (в том числе и продувочных фурм) необходима разработка и внедрение многосопловых (от шести и выше) верхних дутьевых устройств. Однако увеличение числа сопел в фурменных головках приводит к ухудшению охлаждения наконечников, в частности участков их засоплового пространства, в которых в результате расположения сопловых вкладышей на пути движения воды образуются застойные зоны охладителя (рис. 1, а), что является причиной возникновения локальных засопловых участков пленочного кипения воды. По этой причине температура материала наконечника в указанных зонах становится значительно выше остальной части медной чаши головки, что в конечном итоге приводит к перегреву и расплавлению (прогару) материала в засопловых зонах наконечников и, как следствие, выходу из строя верхних продувочных устройств. Особенно страдают сварные конструкции фурменных головок, в засопловые зоны наконечников которых попадают участки сварных швов, и без того

представляющие собой наиболее поражаемые участки из-за более низкой теплопроводности сварочной меди, а также невысокой прочности вследствие примерно в половину меньшей толщины и несколько меньшей плотности сварных швов по сравнению с остальной частью изделия. Площадь засоплового пространства возрастает с увеличением числа сопел — этим и объясняется резкое падение стойкости головок с увеличением в них числа сопел (даже в условиях повышения их всего на одно — с пяти до шести, стойкость шестисопловых головок по сравнению с пятаисопловыми снижается на ~22 % [4]). Поэтому в практике конвертерных цехов стараются применять фурмы с минимальным числом сопел (обычно не превышающим пять), отличающиеся сравнительной простотой конструкции и несколько повышенной стойкостью головок, однако это приводит к неудовлетворительному процессу ведения плавки в конвертере — плохому шлакообразованию, заметалливанию технологического оборудования, снижению выхода жидкой стали, повышению содержания серы в готовой стали и др.

Рис. 1. Схема движения потоков охладителя в засопловых зонах фурменных головок:

а — в классических конструкциях [7, 20]; б — в конструкции с симметричным охлаждением зон засоплового пространства и перегородкой [9, 16]; в — в конструкции с симметричным охлаждением зон засоплового пространства и без перегородки [9, 17]; г — в конструкции с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства (рис. 2 и 3) [10, 21]; 1 — сопловый вкладыш; 2 — застойная зона охладителя; 3 — направляющая лопасть; 4 — перегородка

Fig. 1. Diagram of cooling agent flows motions in farthest nozzle zone of tuyere heads:

a — in classic structures [7, 20]; б — in structures with symmetric cooling of farthest nozzle zone and a partition [9, 16]; в — in structures with symmetric cooling of farthest nozzle zone and without a partition; г — in structures with asymmetric cooling of farthest nozzle zone (Fig. 2 and 3) [10, 21]; 1 — nozzle insertion; 2 — cooling agent stagnant area; 3 — guiding blade; 4 — partition

С целью повышения эффективности процесса конвертирования в 250-т агрегатах кафедрой металлургии стали и литейного производства (сейчас — кафедра металлургии черных металлов) Днепродзержинского государственного технического университета (сейчас — Днепровский государственный технический университет, Украина) совместно с конвертерным цехом и механическими службами ОАО «Днепровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского» (ДМКД, сейчас — ПАО «Днепровский металлургический комбинат», Украина) разработаны, опробованы и внедрены рациональные режимы дутья и присадок сыпучих материалов [5] при верхней продувке низкомарганцовистых чугунов с использованием шестисопловых фурм блочной [6] и обычной [4] конструкций, а также дутьевых устройств повышенной стойкости [7]. Выбор именно шестисопловой конструкции объясняется возможностью обеспечения рациональной технологии ведения конвертерной плавки при размещении минимально необходимого числа продувочных сопел в головках верхнего дутьевого устройства.

Дальнейшее увеличение стойкости фурменных головок достигалось устранением в ее охлаждающем тракте за соплами дутьевого устройства (по ходу движения воды) застойных зон охладителя согласно вариантам (см. рис. 1, б, г), которые были предложены в работе [8].

Впервые в практике кислородно-конвертерного производства стали для верхних фурм с центральной подачей воды были разработаны новые конструкции фурменной головки [9, 10] с усовершенствованной системой охлаждения, которые предусматривали симметричное [9] и асимметричное [10] охлаждение зон засоплового пространства наконечников путем соответственно симметричной или асимметричной установки за каждым соплом (по ходу движения воды) специальных направляющих лопастей в форме полукольца, что позволяло интенсифицировать подачу охладителя за сопла, тем самым обеспечивая высокоэффективное охлаждение засопловых зон наконечника головок. До этого в конвертерных процессах для производства стали [11] всегда использовались фурмы без охлаждения засоплового пространства наконечников фурменных головок, хотя известен вариант охлаждения засопловых зон за счет подачи в них отдельных потоков воды сверху [12]. Однако в конструкциях головок к верхним фурмам с центральной подачей воды использование такого варианта охлаждения зон засоплового пространства наконечника сопряжено с усложнением и утяжелением конструкции головки [13], а также с увеличением сложности и трудоемкости ее сборки, что было подтверждено в промышленных условиях на 250-т конвертерах [14, 15].

Рис. 2. Конструкции [10] шестисопловой головки с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства наконечника (а, б) и направляющей лопасти (в), схема охлаждения засоплового пространства наконечника (г):
1 — нижняя чаша (наконечник); 2 — патрубок подачи воды; 3 — патрубок подвода кислорода; 4 — патрубок отвода воды; 5 — вкладыши с соплами Лаваля; 6 — верхняя чаша (коллектор); 7 — охлаждающий тракт головки; 8 — направляющая лопасть, установленная асимметрично; 9 — серповидный зазор; 10 — асимметричная щель

Fig. 2. Structure [10] of six-blades head with asymmetric cooling of farthest zones of tip (a, б) and guiding blade (в), diagram of cooling of the tip farthest zone (г):

1 — lower bowl (tip); 2 — connecting branch of water supply; 3 — connecting branch of oxygen supply; 4 — connecting branch of water drainage; 5 — insertions with Laval nozzles; 6 — upper bowl (collector); 7 — head cooling channel; 8 — guiding blade installed asymmetrically; 9 — falcated gap; 10 — asymmetric slot

Впервые были изготовлены и опробованы [16, 17] два варианта новой конструкции с симметричным охлаждением зон засоплового пространства [9] — с разделением (изоляцией) потоков охладителя за соплом (с перегородкой) [16] и без разделителя потоков воды за соплом (без перегородки) [17]. Сравнительный анализ [18, 19] данных конструкций показал, что первый вариант конструкции фурменной головки с перегородкой и симметричным охлаждением зон засоплового пространства наконечника характеризуется более высокой стойкостью головок по сравнению со вторым вариантом без перегородки.

Стойкость конструкции шестисопловых головок с симметричным охлаждением засоплового пространства и наличием перегородки между соплом и направляющей лопастью [16] возросла в 1,2 раза (их средняя стойкость составила 152 плавки) по сравнению с аналогичной конструкцией шестисопловых головок без направляющих лопастей (их стойкость составляла 114–143 плавки при средней стойкости в 126,67 плавки), которые, в свою очередь, характеризовались [7, 20] большей в 2,27–2,41 (в среднем в 2,33) раза стойкостью по сравнению со штатными пятисопловыми головками, стойкость кото-

рых составляла 49–63 плавки (в среднем 54,33 плавки). Испытания второго варианта (без перегородки) конструкции фурменной головки с симметричным охлаждением зон засоплового пространства первоначально не увенчались успехом [18], так как в результате упрощения конструкции направляющих лопастей снизилась пропускная способность отводящего тракта наконечника — максимальный расход воды на охлаждение фурмы уменьшился до 270 м³/ч из-за образования за соплами тормозящих обратных потоков охладителя. Модернизация второго вари-

анта конструкции дутьевого устройства путем использования направляющих лопастей, имеющих профиль, аналогичный профилю лопастей в первом варианте конструкции [16], позволила устранить снижение пропускной способности отводящего тракта головки, а опытно-промышленное опробование показало повышение стойкости таких фурменных головок в 1,168 раза (средняя их стойкость составила 148 плавков) по сравнению с аналогичной конструкцией шестисопловых головок без направляющих лопастей [7, 20].

Рис. 3. Внешний вид (а, б) конструкции шестисопловой фурменной головки с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства наконечника [10] и вид наконечника изнутри (в, д) при сборке дутьевого устройства:

а — вид головки снаружи; б — вид головки изнутри; в — вид наконечника изнутри (коллектор снят, сопла не приварены); г — сопловый блок, оснащенный асимметрично установленной направляющей лопастью; д — вид наконечника изнутри, оснащенного направляющими лопастями, установленными через сопло (коллектор снят, сопла не приварены)

Fig. 3. External view (a, б) of six-bladed tuyere head with asymmetric cooling of tip farthest zones [10] and tip view from inside (в, д) during the blowing unit assembling:

а — head view from outside; б — head view from inside; в — tip view from inside (the collector taken off, nozzles not welded); г — nozzle block, equipped by asymmetrically installed guiding blade; д — tip view from inside, the tip equipped by guiding blades, installed through the nozzle (the collector taken off, nozzles not welded)

Также впервые была изготовлена и опробована [21] новая конструкция фурменной головки с усовершенствованной системой охлаждения [10], в которой предусматривалось асимметричное охлаждение зон засоплового пространства наконечников путем асимметричной (относительно боковой поверхности соплового блока)

установки за соплами по ходу движения воды специальных направляющих лопастей (см. рис. 2, а, б), имеющих форму полукольца (см. рис. 2, в), в которых снизу выполнен асимметричный вырез, и крепящихся посредством сварки к внутренней поверхности медного наконечника (см. рис. 3).

Следует сказать, что все другие, более поздние, предлагаемые варианты асимметричного охлаждения засопловых зон наконечников фурменных головок будут иметь невысокую эффективность охлаждения указанных зон. Например, полезные модели [22–24], работоспособность которых так и не была установлена в промышленных условиях, а предполагаемый охлаждающий эффект был рассчитан [23–25] лишь на основе численных методов, будут характеризоваться более низкой эффективностью охлаждения засопловых зон наконечника из-за простоты выполнения направляющих лопастей, которые хотя и смогут осуществить асимметричный подвод воды непосредственно в засопловые зоны наконечника, но при этом будут способствовать не соединению, как описано в работе [22], а столкновению двух потоков воды — одного закрученного, формируемого направляющей лопастью за соплом, и второго, возникающего в результате обтекания охладителем сопла со стороны, где лопасть отсутствует, вследствие разного направления движения указанных охлаждающих потоков. Это снизит скорость движения воды за соплом и тем самым эффективность охлаждения наконечника фурменной головки. Кроме того, направляющие лопасти такой конструкции (без щелевого зазора под ними) [22–24] будут сами способствовать образованию застойных зон охладителя за ними вследствие более слабой циркуляции воды сзади (по ходу движения воды) таких лопастей.

Асимметричная установка за каждым соплом головки (по ходу движения воды) по одной направляющей лопасти (см. рис. 2, *в*) предложенной авторами работы [10] конструкции позволяет осуществить подвод охладителя в менее охлаждаемые засопловые зоны при интенсивном закручивании потоков воды и увеличении их скорости с целью интенсификации охлаждения. Выполнение направляющих лопастей в форме полукольца и асимметричное расположение каждой направляющей лопасти относительно продольной оси сопла с серповидным зазором, образуемым наружной боковой поверхностью сопла и внутренней поверхностью направляющей лопасти, обеспечивает возможность равномерного распределения охладителя с одинаковой скоростью по всей поверхности наконечника, которая находится за соплами по ходу движения воды, чего не наблюдается в фурменных головках без направляющих лопастей, в которых в зонах непосредственно за соплами расход воды и ее скорость значительно меньше, чем в остальных зонах засоплового пространства наконечника в результате торможения потоков охладителя сопловыми вкладышами, расположенными на пути движения охладителя. Интенсивность

охлаждения засопловых зон наконечника регулируется величиной (высотой и длиной) выреза для прохода охлаждающей воды, выполненного асимметрично относительно середины самой лопасти на ее нижнем торце, за счет которого при установке на внутренней поверхности наконечника направляющей лопасти образуется щелевой зазор между ее нижним торцом и внутренней поверхностью наконечника.

Это позволит в максимальной степени повысить эффективность теплосъема с внутренней поверхности засопловых зон наконечника и устранить возможность образования застойных зон охладителя за самими направляющими лопастями, тем самым обеспечив высокоэффективное охлаждение поверхности медных наконечников, что положительно скажется на стойкости головок верхних дутьевых устройств.

Охлаждение фурменных головок с асимметричной установкой направляющих лопастей [10] осуществляется следующим образом (см. рис. 2). Охлаждающая вода поступает в охлаждающий тракт 7 дутьевой головки через центральный патрубок подачи воды 2 (см. рис. 2, *а, б*). Перед каждым соплом 5 сплошной поток охладителя, благодаря наличию направляющих лопастей 8, делится на три группы — основные I, III и дополнительную II (см. рис. 2, *в*). Основные группы потоков I, III (расход воды составляет ~59 % от общего ее расхода на охлаждение) продолжают движение — поток I проходит за направляющими лопастями 8 и, слегка огибая их корпус, уходит в отводящий тракт фурмы между наружным 4 и внутренним 3 патрубками головки; поток III, огибая корпус сопел 5, также уходит в отводящий тракт фурмы между наружным 4 и внутренним 3 патрубками головки. При этом поток I охлаждает зону за дальним от сопла выступом на нижнем торце направляющей лопасти, поток III охлаждает зону за ближним к соплу выступом на нижнем торце направляющей лопасти, а зоны за соплами и за самими направляющими лопастями группы потоков воды I и III не охлаждаются. Для этого предусмотрена дополнительная группа потоков II (расход воды составляет ~41 % от общего), которая, огибая сопла 5, с одной стороны проходит в серповидные зазоры 9 между корпусами сопел 5 и внутренней поверхностью направляющих лопастей 8, получает вращательное движение и, охлаждая зоны за соплами 5, выходит через асимметричные щели 10 под направляющими лопастями 8 между их нижним торцом и внутренней поверхностью наконечника 1, охлаждая зоны за направляющими лопастями 8. На конечном участке отводящего канала 7 в головке за направляющими лопастями

стями 8 дополнительные потоки воды II смешиваются с основными I, III и общим потоком и направляются в отводящий тракт фурмы. Таким образом, за счет закручивания потока воды II для подачи его за каждый сопловый блок обеспечивается равномерный высокоэффективный теплосъем со всей внутренней поверхности наконечника I и полностью исключается образование локальных участков его перегрева за соплами 5 и за самими направляющими лопастями 8.

Работоспособность разработанной и изготовленной конструкции шестисопловой фурменной головки с асимметричным охлаждением засоплового пространства [10] установлена в ходе кампании опытно-промышленных плавов на 250-т конвертерах ОАО ДМКД при расходах кислорода 800–1200 м³/мин в режиме частичного дожигания отходящих газов [21]. Оптимальный расход воды на охлаждение был снижен и составлял 300 м³/ч против принятого в цехе в пределах 320–340 м³/ч, при этом разность температур воды на входе и выходе из фурмы колебалась в пределах 11–16 °С в зависимости от времени продувки.

Изменение высоты фурмы и присадки сыпучих материалов по ходу продувки производили с учетом обеспечения нормального протекания процесса шлакообразования — без выбросов, значительных выносов и промежуточного скачивания шлака. Значения начальной и рабочей высот верхней фурмы в ходе продувки определялись на основе “горячего” моделирования [26]. Дутьевой режим, а также режим присадок сыпучих материалов подробно описаны в работах [27, 28].

В очередной раз [21] подтверждена эффективность отработанных режимов [4, 6, 7, 27, 28] дутья и присадок сыпучих материалов уже с использованием новой конструкции [10] шестисопловой фурмы с асимметричным охлаждением засопловых зон наконечника при выплавке низкоуглеродистых сталей, технико-экономические показатели плавов практически идентичны данным, приведенным в работе [19].

По стойкости фурменных головок опытно-промышленные испытания показали следующие результаты [21]. Стойкость шестисопловых головок с асимметричным охлаждением засоплового пространства возросла в 1,287 раза (средняя стойкость составила 163 плавки) по сравнению с аналогичными шестисопловыми головками без направляющих лопастей (средняя их стойкость составляла 126,67 плавов), которые, в свою очередь, характеризовались большей в 2,33 раза

средней стойкостью по сравнению с пятисопловыми штатными головками (средняя их стойкость составляла 54,33 плавки). По сравнению с фурменными головками с симметричной подачей охладителя в засопловые зоны, разработанными ранее (без перегородки между соплом и серединой направляющей лопасти и с перегородкой) [9, 16–19], конструкция с асимметричным охлаждением засопловых зон наконечника [10] имела более высокую стойкость [21], что свидетельствует о большей эффективности охлаждения наконечника за счет увеличения степени закручивания потоков охладителя за соплами при одном и том же расходе воды (который был снижен по сравнению с головками фурмы, не имеющими направляющих лопастей) на охлаждение.

С целью проверки влияния охлаждения засопловых зон на стойкость фурменных головок был изготовлен вариант конструкции головки с чередованием установки направляющих лопастей сзади сопловых вкладышей — одно сопло оснащалось лопастью, другое было без лопасти и т. д. (см. рис. 3, д). Такая головка, как показал последующий анализ, простояла 126 плавов и вышла из строя вследствие прогара участков наружного сварочного шва в засопловом пространстве одного сопла из трех, которые не имели направляющих лопастей для охлаждения зон засоплового пространства наконечника. Таким образом, было доказано, что подвод охладителя в засопловые зоны наконечника положительно влияет на стойкость фурменных головок, причем это влияние значительно.

Кроме того, заметалливание стволлов шестисопловых фурм с головками, имеющими асимметричное охлаждение зон засоплового пространства наконечника, отсутствовало на протяжении 79–81-й плавов, в то время как пятисопловые дутьевые устройства металлились после 1–5-й плавки, что свидетельствует о большей эффективности дутьевого и шлакового режимов ведения плавки [5] с применением шестисопловых дутьевых устройств.

Приемочная комиссия комбината по результатам испытаний вынесла решение о внедрении в производство предложенной конструкции шестисопловой фурменной головки с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства наконечника [10]. Ведутся работы по дальнейшей оптимизации конструкции фурменных головок и способа их изготовления с целью повышения их стойкости и надежности, а также снижения трудоемкости изготовления [29, 30].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баптизмандский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. — М.: Металлургия, 1975. — 376 с.
2. Пантейков С.П. О рациональной конструкции наконечника для головок верхних фурм конвертеров // Сталь. 2001. № 4. С. 27–30.
3. Пантейков С.П. Современная конструкция фурменной головки и рациональные технологические режимы ее использования // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2001. № 10. С. 30–33.
4. Чернятевич А.Г., Пантейков С.П., Учитель Л.М. и др. Повышение эффективности верхней продувки в 250-т конвертерных агрегатах // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2000. № 1–2. С. 41–45.
5. Пат. 47732 Украины, МПК⁷ С 21 С 5/28. Способ верхней продувки расплава / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, В.В. Несвет и др. // Заявл. 21.08.2001; опубл. 15.07.2002. Бюл. № 7.
6. Чернятевич А.Г., Учитель Л.М., Пантейков С.П. и др. Освоение шестисопловых наконечников фурм и технологии плавки с их использованием // Теория и практика кислородно-конвертерных процессов. Труды IX Междунар. научно-техн. конф. — Днепропетровск, 1998. С. 57, 58.
7. Пантейков С.П. Использование шестисопловых головок повышенной стойкости к верхним фурмам и технологии ведения плавки с их использованием в конвертерном цехе ОАО “Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского” // Металл-2000: Тезисы докладов научно-технич. конф. — Жлобин, 2000. С. 47–50.
8. Пантейков С.П. Пути совершенствования систем охлаждения наконечников верхних дутьевых фурм для крупнотоннажных конвертеров // Сб. науч. трудов Днепропетровского гос. техн. ун-та (технические науки). В 2 т. — Днепропетровск: Системные технологии, 2000. Т. 1. С. 25–32.
9. Пат. 40428 Украины, МПК⁷ С 21 С 5/48. Фурменная головка с симметричным охлаждением сопел / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, Л.М. Учитель и др. // Заявл. 25.01.2001; опубл. 16.07.2001. Бюл. № 6.
10. Пат. 46328 Украины, МПК⁷ С 21 С 5/48. Фурменная головка с асимметричным охлаждением сопел / С.П. Пантейков, Л.М. Учитель, В.В. Ивко и др. // Заявл. 21.06.2001; опубл. 15.05.2002. Бюл. № 5.
11. Пантейков С.П. Конвертерные процессы получения стали: возникновение, эволюция, перспективы развития // Металлург. 2017. № 6. С. 93–102.
12. А.с. 118357 СССР, МКИ С 21 С 5/48. Наконечник фурмы / В.И. Баптизмандский, А.В. Шибко, В.Б. Охотский и др. // Заявл. 18.01.1984; опубл. 07.10.1985. Бюл. № 37.
13. Пат. 40296 Украины, МПК⁷ С 21 С 5/48. Головка к верхней кислородной фурме с центральным подводом воды / С.П. Пантейков, В.В. Несвет, Л.М. Учитель и др. // Заявл. 23.11.2000; опубл. 16.07.2001. Бюл. № 6.
14. Использование в конвертерном цехе ОАО “Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского” сварных конструкций фурменных головок с усовершенствованной системой охлаждения наконечников / С.П. Пантейков, В.В. Несвет, Л.М. Учитель и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. № 7 (279). С. 162–164.
15. Совершенствование системы охлаждения фурменных головок конвертера / С.П. Пантейков, В.В. Несвет, Л.М. Учитель и др. // Сталь. 2013. № 8. С. 53–58.
16. Применение в конвертерном цехе ОАО “Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского” конструкции фурменных головок с симметричным охлаждением засопловых зон отдельными потоками / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, Л.М. Учитель и др. // Труды VII Конгресса сталеплавателей. — М.: Черметинформация, 2003. С. 235–238.
17. Использование в конвертерном цехе ОАО “Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского” конструкции фурменных головок с симметричным охлаждением засопловых зон без изоляции потоков воды / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, Л.М. Учитель и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность (по материалам X Междунар. научно-технич. конф. “Теория и практика кислородно-конвертерных процессов”). 2002. № 7. С. 106–108.
18. Усовершенствование системы охлаждения сварных конструкций фурменных головок для 250-тонных конвертеров / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, Л.М. Учитель и др. // Новини науки Придніпров’я: науково-практичний журнал, інженерні дисципліни (по материалам XIII Междунар. научно-технич. конф. “Теория и практика сталеплавления процессов”. Посвящается 90-летию основателя теории конвертерных процессов производства стали академика В.И. Баптизмандского). 2008. № 1–2. С. 54–59.
19. Усовершенствование системы охлаждения сварных конструкций фурменных головок для 250-тонных конвертеров / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, Л.М. Учитель и др. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2008. № 12 (1308). С. 32–39.
20. Повышение стойкости верхних конвертерных фурм / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, Л.М. Учитель и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 6. С. 17, 18.
21. Применение фурменных головок с асимметричным охлаждением зон засоплового пространства в конвертерном цехе ОАО “Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э. Дзержинского” / С.П. Пантейков, Л.М. Учитель, В.В. Ивко и др. // Современные проблемы производства стали и управление качеством подготовки специалистов: Материалы междунар. научно-методич. конф., посвященной 90-летию со дня рождения ученого-металлурга М.Я. Меджибожского. — Мариуполь, 2002. С. 160, 161.
22. Пат. 46563 Украины, МПК⁷ С 21 С 5/48. Фурменная головка с асимметричным охлаждением сопел / А.В. Сущенко, А.П. Балаба, А.С. Гриценко // Заявл. 17.07.2009; опубл. 25.12.2009. Бюл. № 24.
23. Пат. 113238 Украины, МПК С 21 С 5/48 (2006.01). Фурменная головка с турбулизаторами охладителя / А.Г. Величко, Тянь И Лю, Д.А. Прохоренко и др. // Заявл. 30.05.2016; опубл. 25.01.2017. Бюл. № 2.
24. Пат. 127163 Украины, МПК С 21 С 5/48 (2006.01). Фурменная головка с элементами пассивного усиления турбулентности охладителя / А.Г. Величко, Тянь И Лю, Д.А. Прохоренко и др. // Заявл. 18.12.2017; опубл. 25.07.2018. Бюл. № 14.

25. Сущенко А.В., Чернятевич А.Г., Гриценко А.С. Организация охлаждения засопловых зон наконечников кислородных фурм верхнего дутья // Вестник Приазовского гос. техн. ун-та (серия: технические науки). 2012. Вып. 25. С. 70–80.
26. Пантейков С.П. Разработка многоцелевых конструкций фурм и энергосберегающих методов продувки конвертерной ванны с их использованием: Дис. ... канд. техн. наук. — Днепродзержинск, 1998. — 332 с.
27. Повышение ресурсосберегающей эффективности при верхней продувке 250-тонной конвертерной ванны / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, В.В. Несвет и др. // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2003. № 4. С. 66–72.
28. Повышение ресурсосберегающей эффективности верхней продувки 250-т конвертерной ванны / С.П. Пантейков, А.Г. Чернятевич, Л.М. Учитель и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. № 5. С. 24–29.
29. Разработка безопасных конструкций фурменных головок / С.П. Пантейков, Ю.П. Махлай, Е.С. Пантейкова, Л.В. Кадацкий // Сталь. 2015. № 9. С. 15–17.
30. Упрочнение сварных швов в фурменных головках / С.П. Пантейков, Е.С. Пантейкова, Л.В. Кадацкий, Е.А. Старкова // Сталь. 2017. № 12. С. 28–35.

Поступила 20 января 2019 г.

REFERENCES

1. Baptizmanskii V.I. *Teoriya kislorodno-konverternogo protsessa* [Theory of the oxygen-converter process]. Moscow: Metallurgiya, 1975, 376 p. (In Russ.).
2. Panteikov S.P. On the rational design of the tip for the heads of the upper lances of the BOF converters. *Stal'*, 2001, no. 4, pp. 27–30. (In Russ.).
3. Panteikov S.P. Modern design of the tuyere head and rational technological modes of its use. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2001, no. 10, pp. 30–33. (In Russ.).
4. Chernyatevich A.G., Panteikov S.P., Uchitel' L.M. etc. Improving the efficiency of the top blowdown in 250-ton BOF converter units. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2000, no. 1–2, pp. 41–45. (In Russ.).
5. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Nesvet V.V. etc. *Sposob verkhnei produvki rasplava* [The method of top blowing the melt]. Patent Ukraine no. 47732. IPC C 21 C 5/28. *Byulleten' izobretenii*, 2002, no. 7.
6. Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M., Panteikov S.P. etc. *Osvoenie shestisoplovykh nakonechnikov furm i tekhnologii plavki s ikh ispol'zovaniem* [Mastering the six-nozzle tips of tuyeres and melting technology using them]. *Teoriya i praktika kislorodno-konverternykh protsessov. Trudy IX Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf.* [Theory and practice of oxygen-converter processes. Proc. of the IX Intern. scientific and technical conf.]. Dnepropetrovsk, 1998, pp. 57, 58. (In Russ.).
7. Panteikov S.P. *Ispol'zovanie shestisoplovykh головок povyshennoi stoikosti k verkhnim furmam i tekhnologii vedeniya plavki s ikh ispol'zovaniem v konverternom tsekhie OAO "Dneprovskii metallurgicheskii kombinat im. F.E. Dzerzhinskogo"* [The use of six-nozzles of increased resistance to upper tuyeres and the technology of melting with their use in the BOF converter shop of JSC "Dneprovsky Iron and Steel Works named F.E. Dzerzhinsky"]. *Metall-2000: Tezisy dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Metal-2000: Abstracts of scientific and technical conferences]. Zhlobin, 2000, pp. 47–50. (In Russ.).
8. Panteikov S.P. *Puti sovershenstvovaniya sistem okhlazhdeniya nakonechnikov verkhnikh dut'evykh furm dlya krupnotonnazhnykh konverterov* [Ways to improve the cooling systems of the tips of the top blowing lances for large-capacity BOF converters]. *Sb. nauch. trudov Dneprodzerzhinskogo gos. tekhn. un-ta (tekhnicheskie nauki). V 2 t.* [Sat scientific works of the Dneprodzerzhinsk state technical university (technical sciences). In 2 vol.]. Dnepropetrovsk: Sistemnye tekhnologii, 2000, vol. 1, pp. 25–32. (In Russ.).
9. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M. etc. *Furmennaya golovka s simmetrichnym okhlazhdeniem sopel* [The tuyere head with symmetric cooling nozzles]. Patent Ukraine no. 40428. IPC C 21 C 5/48. *Byulleten' izobretenii*, 2001, no. 6.
10. Panteikov S.P., Uchitel' L.M., Ivko V.V. etc. *Furmennaya golovka z asimmetrichnym okhlazhdeniem sopel* [The tuyere head with asymmetrical cooling of the nozzles]. Patent Ukraine no. 46328. IPC C 21 C 5/48. *Byulleten' izobretenii*, 2002, no. 5.
11. Panteikov S.P. BOF steel production processes: the emergence, evolution, development prospects. *Metallurg*, 2017, no. 6, pp. 93–102. (In Russ.).
12. Baptizmanskii V.I., Shibko A.V., Okhotskii V.B. etc. *Nakonechnik furmy* [Tip tuyeres]. A.S. USSR no. 118357. IPC C 21 C 5/48. *Byulleten' izobretenij*, 1985, no. 37. (In Russ.).
13. Panteikov S.P., Nesvet V.V., Uchitel' L.M. etc. *Golovka k verkhnei kislorodnoi furme s tsentral'nyim podvodom vody* [Head to the upper oxygen lance with a central water supply]. Patent Ukraine no. 40296. IPC C 21 C 5/48. *Byulleten' izobretenii*, 2001, no. 6.
14. Panteikov S.P., Nesvet V.V., Uchitel' L.M. etc. Use in the converter shop of OJSC "Dneprovsky Metallurgical Plant named after F.E. Dzerzhinsky" welded structures of tuyere heads with an improved tip cooling system. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 2012, no. 7 (279), pp. 162–164. (In Russ.).
15. Panteikov S.P., Nesvet V.V., Uchitel' L.M. etc. Improving the cooling system of the BOF converter heads. *Stal'*, 2013, no. 8, pp. 53–58. (In Russ.).
16. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M. etc. *Primenenie v konverternom tsekhie OAO "Dneprovskii metallurgicheskii kombinat im. F.E. Dzerzhinskogo" konstruktii furmennyykh головок s simmetrichnym okhlazhdeniem zasoplovykh zon razdel'nymi potokami* [Application in the converter shop of OJSC "Dneprovsky Metallurgical Plant named. F.E. Dzerzhinsky" construction of tuyere heads with symmetric cooling of the warm zones with separate flows]. *Trudy VII Kongressa staleplavil'shchikov* [Proc. of the VII Congress of Steelmakers]. Moscow: Chermetinformatsiya, 2003, pp. 235–238. (In Russ.).
17. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M. etc. Use in the BOF shop of OJSC "Dneprovsky Metallurgical Plant named. F.E. Dzerzhinsky" construction of tuyere heads with symmetric cooling of the innermost zones without isolation of

- water flows. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost' (po materialam X Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Teoriya i praktika kislorodno-konverternykh protsessov")*, 2002, no. 7, pp. 106–108.
18. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M. etc. Improving the cooling system of welded structures of tuyere heads for 250-ton converters. *Novini nauki Pridniprov'ya: naukovopraktichnii zhurnal, inzhenerni distsiplini (po materialam XIII Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. "Teoriya i praktika staleplavil'nykh protsessov". Posvyashchaetsya 90-letiyu osnovatelya teorii konverternykh protsessov proizvodstva stali akademika V.I. Baptizmanskogo)*, 2008, no. 1–2, pp. 54–59.
 19. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M. etc. Improving the cooling system of welded structures of tuyere heads for 250-ton converters. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2008, no. 12 (1308), pp. 32–39. (In Russ.).
 20. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M. etc. Increasing the durability of the upper converter tuyeres. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*, 2000, no. 6, pp. 17, 18. (In Russ.).
 21. Panteikov S.P., Uchitel' L.M., Ivko V.V. etc. *Primenenie furnennykh golovok s asimmetrichnym okhlazhdeniem zon zasoplovogo prostranstva v konverternom tsekhe OAO "Dneprovskii metallurgicheskii kombinat im. F.E. Dzerzhinskogo"* [Application of tuyere heads with asymmetrical cooling of zones behind the ground in the BOF shop of OAO "Dneprovsky Metallurgical Combine named after F.E. Dzerzhinsky"]. *Sovremennye problemy proizvodstva stali i upravlenie kachestvom podgotovki spetsialistov: Materialy mezhdunar. nauchno-metodich. konf., posvyashchennoi 90-letiyu so dnya rozhdeniya uchenogo-metallurga M.Ya. Medzhibozhskogo* [Modern problems of steel production and quality management training: Materials of international scientific methodological Conf., dedicated to the 90th anniversary of the birth of metallurgical scientist M. Ya. Medzhibozhsky]. Mariupol', 2002, pp. 160, 161. (In Russ.).
 22. Sushchenko A.V., Balaba A.P., Gritsenko A.S. *Furnennaya golovka s asimmetrichnym okhlazhdeniem sopel* [The tuyere head with asymmetric cooling nozzles]. Patent Ukraine no. 46563. IPC C 21 C 5/48. *Byulleten' izobretenii*, 2009, no. 24.
 23. Velichko A.G., Tyan' I Lyu, Prokhorenko D.A. etc. *Furnennaya golovka s turbulizatorami okhladitelya* [Tuyere head with turbulators cooler]. Patent Ukraine no. 113238. IPC C 21 C 5/48 (2006.01). *Byulleten' izobretenii*, 2017, no. 2.
 24. Velichko A.G., Tyan' I Lyu, Prokhorenko D.A. etc. *Furnennaya golovka s elementami passivnogo usileniya turbulentnosti okhladitelya* [The tuyere head with elements of the passive amplification of the turbulence of the cooler]. Patent Ukraine no. 127163. IPC C 21 C 5/48 (2006.01). *Byulleten' izobretenii*, 2018, no. 14.
 25. Cushchenko A.V., Chernyatevich A.G., Gritsenko A.S. Organization of cooling behind the ends of the oxygen on-ends of the upper blast oxygen tuyeres. *Vestnik Priazovskogo gos. tekhn. un-ta (seriya: tekhnicheskije nauki)*, 2012, no. 25, pp. 70–80. (In Russ.).
 26. Panteikov S.P. *Razrabotka mnogotselevykh konstruksii furn i energosberegayushchikh metodov produvki konverternoi vanny s ikh ispol'zovaniem: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of multi-purpose constructions of tuyeres and energy-saving methods of blowing the converter bath with their use. Cand. Sci. Dis.]. Dneprodzerzhinsk, 1998, 332 p. (In Russ.).
 27. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Nesvet V.V. etc. Increase of resource-saving efficiency at the top blowing of the 250-ton converter bath. *Ekotekhnologii i resursosberezhenie*, 2003, no. 4, pp. 66–72. (In Russ.).
 28. Panteikov S.P., Chernyatevich A.G., Uchitel' L.M. etc. Improving the resource-saving efficiency of the top blow of the 250-t converter bath. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya*, 2003, no. 5, pp. 24–29. (In Russ.).
 29. Panteikov S.P., Makhilai Yu.P., Panteikova E.S., Kadatskii L.V. Development of safe designs of tuyere heads. *Stal'*, 2015, no. 9, pp. 15–17. (In Russ.).
 30. Panteikov S.P., Panteikova E.S., Kadatskii L.V., Starkova E.A. Hardening of welds in tuyere heads. *Stal'*, 2017, no. 12, pp. 28–35. (In Russ.).

Received 20 January 2019