

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.184.244.66

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.1

ПАНТЕЙКОВ С.П., к.т.н., доцент

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

**О СПОСОБАХ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
5-СОПЛОВЫХ ФУРМЕННЫХ ГОЛОВОК В КОНВЕРТЕРНОМ ЦЕХЕ
ПАО «ДНЕПРОВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»**

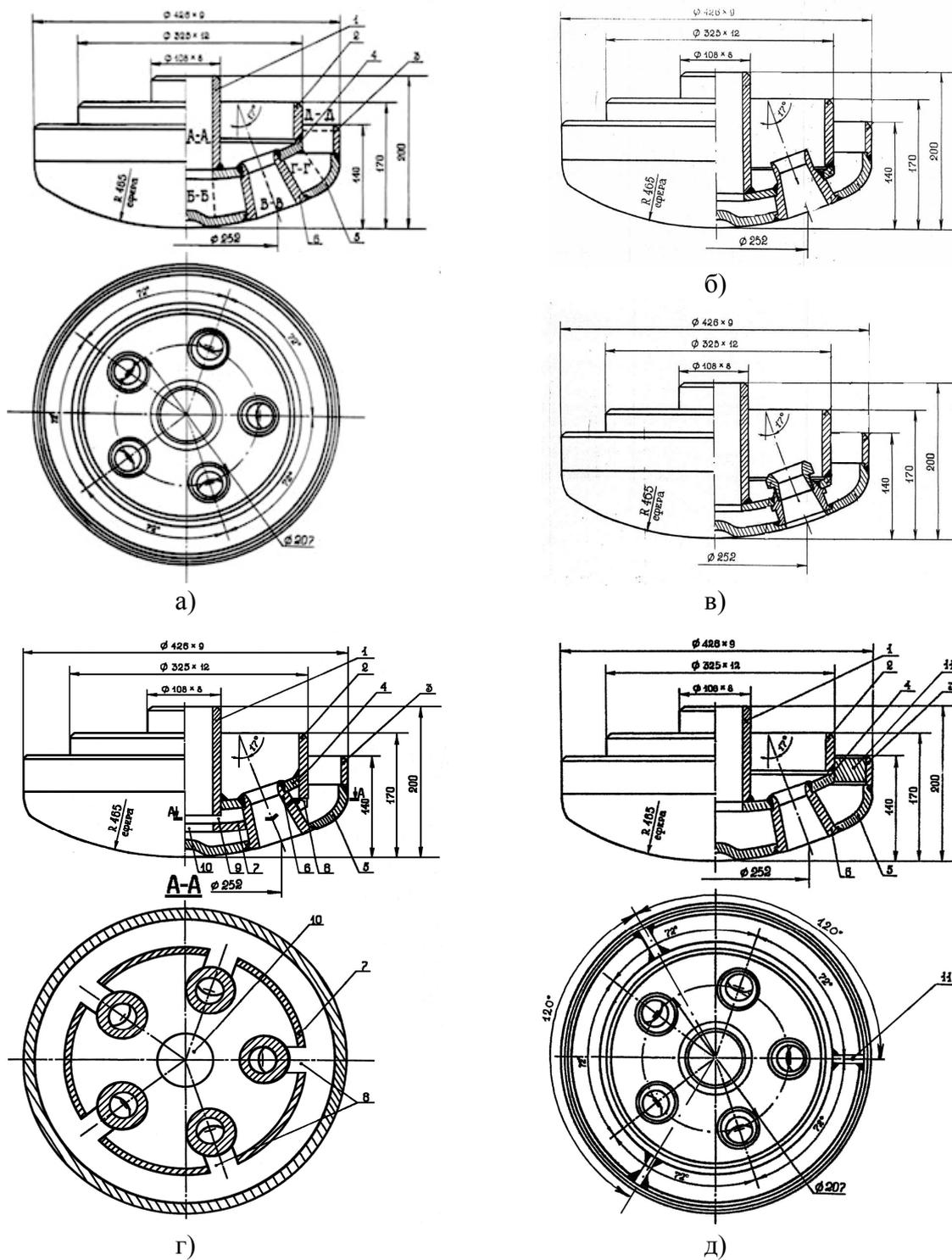
Введение. Конвертерное производство стали в мире характеризуется внедрением ресурсосберегающих методов продувки железоуглеродистого расплава и использованием современных конструкций верхних фурм. Однако, несмотря на то, что практически все страны мира в конвертерном производстве применяют [1-5] ковано-штампованные наконечники для производства фурменных головок и/или используют их полностью цельнолитые конструкции [6-11], в конвертерных цехах Украины продолжают применять устаревшие сварные конструкции фурменных головок (рис.1, а), особенно в цехах с большегрузными (от 250 т и выше) агрегатами.

Постановка задачи. Сварочные швы вокруг сопел, выполненные из меди, являются легко поддающимися разрушению участками любой фурменной головки сварной конструкции в результате их меньшей толщины в сравнении с толщинами соединяемых между собой составных частей головки и низкой плотности меди в получаемых сварочных швах, наружные из которых подвергаются ещё и агрессивному воздействию высокотемпературной среды в полости конвертера. При этом медь сварочных швов не очень прочно скрепляет составные части головки, особенно если они выполнены из разнородных металлов (стали и меди), что имеет место при обваривании медных сопловых вкладышей, вставленных в отверстия стального коллектора (верхней чаши), а также при сварке стального наружного соединительного патрубка фурменной головки с медным наконечником (нижней чашей).

Жёсткость сварных конструкций головок фурм также невысокая, так как в них присутствует значительное количество низкопрочных медных сварочных швов (наружных и внутренних швов вокруг сопловых вкладышей; наружного шва, соединяющего наружное соединительное кольцо с наконечником), что приводит к крайне низкой стойкости сварных конструкций фурменных головок. Именно по этой причине ведущие металлургические страны мира давно отказались от сварных конструкций фурменных головок и применяют головки [1-5], в конструкциях которых присутствует исключительно один наружный сварочный шов из меди, соединяющий наружное переходное кольцо с наконечником¹. Причём в данных конструкциях головок [6-11] с целью сохранения на протяжении максимально возможного времени целостности указанного сварочного шва (выполненного к тому же за счёт более качественной печной сварки) предусмотрена его разгрузка от возникающих в головке при её работе термомеханических напряжений, что увеличивает срок эксплуатации головки, также повышая при этом безопасность работы конструкции верхней фурмы.

Задачей настоящей работы есть экспериментальное подтверждение работоспособности новых и усовершенствованных при непосредственном участии автора конст-

¹ В конструкциях фурменных головок с ковано-штампованными наконечниками присутствуют внутренние сварочные швы из меди, соединяющие верхние и нижние части сопел, являющиеся цельными изделиями с коллектором и наконечником соответственно; указанные швы выполняются способом печной сварки, интенсивно охлаждаются, поэтому имеют высокое качество и прочность.



а) – штатная; б)-г) – с уменьшенным расстоянием между чашами;
 а), б), г), д) – с наружными сварочными швами вокруг сопел;
 в) – с внутренними сварочными швами вокруг сопел; г) – с охлаждением зон
 засоплового пространства наконечника; д) – повышенной жёсткости;
 1, 2, 3 – патрубки подачи воды, кислорода и отвода воды; 4, 5 – верхняя и нижняя чаши;
 6 – сопловый вкладыш; 7 – разделитель потоков воды; 8 – отверстия для прохода
 охладителя; 9 – кольцевой зазор; 10 – центральное отверстие; 11 – ребро жёсткости

Рисунок 1 – Сварные конструкции 5-сопловых фурменных головок

рукций сварных головок с 5-ю соплами к верхним фурмам и оценка эффективности предлагаемых приёмов при изготовлении дутьевых устройств с точки зрения увеличения стойкости сварных фурменных головок.

Результаты работы. С целью повышения стойкости штатных 5-сопловых сварных конструкций фурменных головок (рис.1, а) конвертерного цеха ПАО «Днепропетровский металлургический комбинат» (КЦ ПАО «ДМК», г. Каменское, Украина) была оптимизирована их конструкция. Было уменьшено проходное сечение водоохлаждающего тракта головки за счёт снижения расстояния между верхней и нижней чашами с 59 до 25 мм (рис.1, б), что улучшило охлаждение наконечника за счёт увеличения средних скоростей охладителя в различных сечениях (рис.1, а) водоохлаждающего тракта при неизменных расходах воды.

При расходах охлаждающей воды, принятых в пределах 320-340 м³/час, в аналогичных указанным на рис.1, а) сечениях водоохлаждающего тракта разработанной конструкции головки (рис.1, б) расчётные средние скорости воды увеличились:

- в центральной части фурменной головки (на входе в водоохлаждающий тракт головки, сечение Б-Б) – с 4,9-5,2 м/с (рис.1, а) до 11,9-12,7 м/с (рис.1, б);
- в межсопловом пространстве фурменной головки (между сопловыми вкладышами, сечение В-В) – с 4,2-4,5 м/с (рис.1, а) до 10,1-10,7 м/с (рис.1, б);
- на периферии фурменной головки (на выходе из водоохлаждающего тракта головки, сечение Г-Г) – с 1,4-1,5 м/с (рис.1, а) до 3,4-3,6 м/с (рис.1, б).

Расчётные средние скорости воды в подводящем (перед водоохлаждающим трактом головки, сечение А-А) и в отводящем (за водоохлаждающим трактом головки, сечение Д-Д) трактах верхней фурмы остались неизменными и составляли соответственно 13,4-14,2 м/с и 1,9-2,0 м/с.

Средняя стойкость фурменных головок с уменьшенным расстоянием между чашами (рис.1, б) составила 78 плавов, т.е. увеличилась в 1,39 раз по сравнению со средней стойкостью штатных головок (рис.1, а), которая составляла 41 плавку.

Для дальнейшего повышения стойкости сварных конструкций фурменных головок с 5-ю соплами были устранены с наружного торца медных наконечников сварочные швы вокруг сопловых вкладышей за счёт приваривания их к внутренней поверхности наконечника (рис.1, в). Сопловые вкладыши выполнялись из двух частей (верхняя часть – в виде гайки, свободно выкручивалась и использовалась на последующих головках), что на 40% уменьшало расход меди на их изготовление. Расстояние между чашами головки без сварочных швов снаружи наконечника (рис.1, в) выполнялось таким же, как и в предыдущем разработанном варианте конструкции (рис.1, б), поэтому расчётные средние скорости охлаждающей воды в аналогичных сечениях (рис.1, а) фурменной головки без наружных сварочных швов вокруг сопел (рис.1, в) не изменились. Средняя стойкость конструкций фурменных головок со сварочными швами на внутренней поверхности наконечника (рис.1, в) составила 85 плавов, т.е. увеличилась² в 1,51 раза по сравнению со штатными головками (рис.1, а), средняя стойкость которых находилась на уровне 41 плавки. При этом средние скорости воды в зонах засоплового пространства наконечника (непосредственно за сопловыми вкладышами) в обеих разработанных конструкциях фурменной головки (рис.1, б, в) практически равнялись нулю из-за расположения сопловых вкладышей на пути движения охладителя и образования застойных зон.

Поэтому дальнейшее совершенствование 5-сопловых сварных конструкций фурменных головок осуществлялось за счёт разработки новой конструкции [12], в которой

² Исследования работы данной и предыдущей конструкций фурменной головки проводились под руководством д.т.н., проф. Чернятевича А.Г.

предусматривалось охлаждение зон засоплового пространства наконечника, в соответствии с предложениями [13]. Для обеспечения сохранения в новой разработанной конструкции [12] фурменной головки (рис.1, г) значений средних скоростей воды в аналогичных указанным на рис.1, а) сечениям на прежнем уровне при неизменных расходах охладителя, т.е. как и в предыдущих конструкциях головок (рис.1, б, в), расстояние между верхней и нижней чашами было уменьшено до 23 мм, так как часть охладителя ($\approx 10\%$) уходила через кольцевой зазор 9 (рис.1, г) в верхнюю часть водоохлаждающего тракта головки, отделённую от его нижней части разделителем потоков воды 7. Из верхней части водоохлаждающего тракта головки этот поток воды поступал через отверстия 8 (рис.1, г) на охлаждение засопловых зон наконечника. Это позволило путём такого распределения воды в головке фурмы [12] повысить её (рис.1, г) среднюю стойкость до 172-х плавков³, которая возросла в сравнении с 5-сопловыми конструкциями головок без охлаждения засопловых зон наконечника, в которых находятся участки наружных сварочных швов вокруг сопел (рис.1, а, б):

– в 4,195 раза по сравнению с 5-сопловыми штатными головками (рис.1, а), средняя стойкость которых составила 41 плавку;

– в 2,205 раза по сравнению с 5-сопловыми головками без охлаждения засопловых зон наконечника и с уменьшенной высотой охлаждающего тракта (расстоянием между чашами дутьевого устройства составляло 25 мм) фурменной головки (рис.1, б), средняя стойкость которых составила 78 плавков.

Расчётная средняя скорость охладителя в засопловых зонах наконечника фурменной головки [12] при этом составляла 10,0-10,5 м/с при неизменном общем расходе воды на охлаждение дутьевых устройств в пределах 320-340 м³/час.

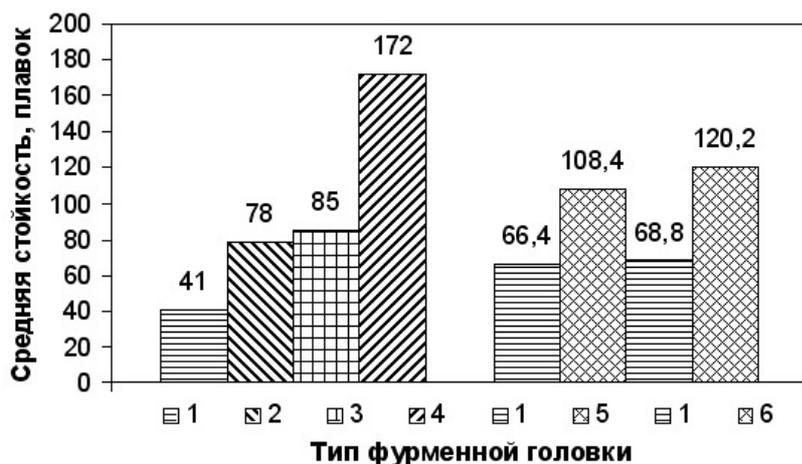
С целью увеличения жёсткости сварной конструкции 5-сопловой фурменной головки, что было продиктовано повышением её стойкости, была разработана новая «жёсткая» конструкция устройства [14], в которой выполнялось дополнительное скрепление рёбрами жёсткости составных частей фурменной головки между собой, уменьшая таким образом нагрузку на все сварочные швы конструкции. Были изготовлены³ два варианта «жёсткой» конструкции 5-сопловой головки (рис.1, д), которые имели по 3 ребра жёсткости толщиной 3 мм и 5 мм соответственно. «Жёсткие» сварные конструкции 5-сопловой головки (рис.1, д) показали увеличение средней стойкости в сравнении со штатными головками (рис.1, а): в первой партии (рёбра жёсткости 3 мм) – в 1,63 раза, а во второй (рёбра жёсткости 5 мм) – в 1,75 раза, что составило соответственно 108,4 и 120,2 плавки (средние стойкости штатных головок (рис.1, а) на момент проведения исследований составляли 66,4 и 68,8 плавки соответственно).

Значения средней стойкости штатной и всех разработанных (и перечисленных выше) сварных конструкций 5-сопловых фурменных головок к верхним дутьевым устройствам для 250-т конвертеров КЦ ПАО «ДМК» приведены на рис.2.

Проведённый комплекс промышленных исследований⁴ работы сварных конструкций 5-сопловых головок к верхним фурмам большегрузных 250-т агрегатов КЦ ПАО «ДМК» позволил установить, что наибольшей стойкостью обладают те дутьевые устройства, в которых предусмотрено охлаждение зон засоплового пространства наконечника (рис.2, область 4).

³ Исследования работы данной и последующих за ней конструкций фурменных головок проводились под руководством автора работы.

⁴ В исследованиях на разных стадиях принимали участие: Несвет В.В., Учитель Л.М., Родь А.Г., Ивко В.В., Махлай Ю.П., Гребенюк Б.Ю., Кузьминых Б.Л., Мазай В.Г., Несвет К.В., Ситало А.А., Моцный В.В., Дерипаско В.А., Жидков А.П., Усенко О.Г., Волок В.А., Харченко Ю.И., Олияр В.Е., Сидорин Д.В., Кадацкий Л.В., Белошевский В.М., Соколов А.Н., Лосева Т.И., Женилов В.В., Галаганов А.С., Хрисанфов А.Н., Чаленко Ю.А.



- 1 – штатная (различные периоды времени);
 2, 3 – с уменьшенным расстоянием между чашами;
 3 – без сварочных швов снаружи головки;
 4 – с охлаждением засопловых зон;
 5, 6 – «жесткие» конструкции (ребра жесткости – 3 мм и 5 мм соответственно)

Рисунок 2 – Средняя стойкость сварных конструкций 5-сопловых фурменных головок

при расходах воды 320-340 м³/час) для осуществления надлежащего охлаждения боковой поверхности наконечников и наружной трубы фурмы в области их стыковки друг с другом и выше. В разработанных 5-сопловых сварочных конструкциях фурменных головок с уменьшенным проходным сечением их водоохлаждающего тракта (рис.1, б-г) были недостаточны и средние скорости охладителя на периферии наконечника (на выходе из водоохлаждающего тракта головки, сечение Г-Г), которые хоть и увеличились с 1,4-1,5 м/с (штатная и разработанная «жесткая» конструкции, рис.1, а, д) до 3,4-3,6 м/с (разработанные конструкции с уменьшенными расстояниями между чашами головки, рис.1, б-г), однако при этом также не обеспечивали эффективного охлаждения наконечников при указанных невысоких средних скоростях воды, общий расход которой составлял 320-340 м³/час. Перенос сварочных швов из меди, удерживающих сопловые вкладыши в медном наконечнике, с его наружной поверхности (рис.1, б) на внутреннюю (рис.1, в) оказался малоэффективным с точки зрения повышения стойкости фурменной головки (средняя стойкость головок увеличилась всего на 7 плавков – с 78-и до 85-и плавков, рис.2, область 3).

С целью максимизации стойкости сварных конструкций фурменных головок в случае продолжения их эксплуатации в конвертерных цехах необходимо использовать разработанные позднее сварные конструкции фурменных головок, в которых сварочные швы и сопловые вкладыши соответственно выполнены и изготовлены по запатентованным вариантам, описанным в работе [15].

В целом же проведенный анализ стойкости сварных конструкций фурменных головок (рис.1) позволяет утверждать о необходимости полного устранения в головке сварочных швов из меди (как наружных швов, подвергающихся высокотемпературному и механическому воздействию, так и внутренних швов, испытывающих напряжения), удерживающих сопловые вкладыши в отверстиях сварных наконечника и коллектора фурменной головки. При этом наружный сварочный шов из меди, присутствующий в любой конструкции дутьевого устройства и соединяющий между собой стальное

Достаточно действенными также оказались меры по повышению значений средних скоростей охладителя в сварных конструкциях фурменных головок (рис.2, область 2) и увеличению их жесткости (рис.2, области 5 и 6). При этом, средние скорости воды в отводящем тракте верхней фурмы (за водоохлаждающим трактом головки, сечение Д-Д, рис.1, а), в том числе и в предложенных конструкциях дутьевых устройств с повышенной стойкостью (рис.1, б-д), являются крайне недостаточными (1,9-2,0 м/с

наружное переходное кольцо головки и медную нижнюю чашу (наконечник), необходимо будет обязательно разгружать от напряжений, возникающих в конструкции фурменной головки при её эксплуатации.

Выводы. В данной работе на основе комплекса промышленных экспериментов на 250-т конвертерах впервые подтверждены теоретические положения повышения стойкости фурменных головок, изложенные автором в работе [13], и изучена степень их эффективности. Исследования показали, что наиболее действенной мерой по увеличению стойкости фурменных головок является обеспечение охлаждения засопловых зон наконечника. Интенсификация охлаждения всей внутренней поверхности наконечников и повышение жёсткости самой сварной конструкции фурменной головки также значительно (хотя и в несколько меньшей степени) влияет на увеличение стойкости головок. Мероприятия по переносу сварочных швов с наружной на внутреннюю поверхность наконечника привело хоть и к положительным, но всё же к сравнительно невысоким результатам. Полученные данные свидетельствует о том, что сварочные швы, выполненные из меди вокруг сопловых вкладышей, которые удерживаются за счёт этого в наконечнике (а также и в коллекторе) головки, являются тем лимитирующим звеном, которое не позволяет достичь высокой стойкости сварных конструкций фурменных головок, что свидетельствует в пользу применения вместо них ковано-штампованных наконечников (вместе с ковано-штампованными коллекторами) и/или их цельнолитых конструкций [6-11], обладающих более высокой стойкостью [1-5], а применение описанных выше приёмов позволит также повысить и их стойкость. Результаты экспериментальной оценки степени эффективности предложенных приёмов повышения стойкости фурменных головок, отражённые в данной работе, позволят в дальнейшем более эффективно справляться с данной проблемой, которая всегда присутствует в конвертерных цехах Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ming L., Rong Z. Research on coherent jet oxygen lance in BOF steelmaking process. Metallurgical Research & Technology. Volume 116, Issue 5. March 2019. id.502. 8 pp.
2. Garajau F.S., Guerra M.de S.L., Maia B.T., Cetlin P.R. Effects of post combustion temperature on the wear of the supersonic nozzles in BOF lance tip. Engineering Failure Analysis. Vol. 96. February 2019. P.175-185.
3. Continuous Developments at the Steel Plant 1 Usiminas Ipatinga Through Slagless Technology / B.T.Maia, A.R.Ribeiro, B.O. de A.Santos (in memoria) et al. Iron and Steel Technology. Vol. 2 (4). January 2015. P.2125-2135.
4. Maia B.T., Imagawa R.K., Petrucelli A.C., Tavares R.P. Effect of blow parameters in the jet penetration by physical model of BOF converter. Journal of Materials Research and Technology. Vol. 3, Issue 3. July-September 2014. P.244-256.
5. Application of computational fluid dynamics to steelmaking processes / J.Schlueter, J.Kempken, H.-J.Odenthal et al. Revue de Métallurgie. Vol. 128 (10). October 2008. P.505-512.
6. SAAR METALL Gruppe. URL: http://saarmetallgruppe.com/?page_id=50&lang=en (дата обращения: 13.01.2020).
7. Impact GmbH. URL: <http://www.impact-moers.de/product.htm> (дата обращения: 20.01.2020).
8. Made-in-China. Oxygen Lance And Lance Nozzle. URL: <https://www.made-in-china.com/showroom/chongsheng/product-detaildoensbfVnEpS/China-Oxygen-Lance-And-Lance-Nozzle.html> (дата обращения: 13.01.2020).
9. AMK Metallurgical Machinery Group Co., Ltd. URL: https://amkgroup.en.ecplaza.net/products/oxygen-lance-tip_4431922 (дата обращения: 13.01.2020).

10. BUILD INDUSTRIAL PAKISTAN. URL: <http://buildindustrialpakistan.blogspot.com/2014/01/water-cooled-oxygen-blowing-lance-vital.html> (дата обращения: 13.01.2020).
11. tradeKOREA. All Categories. URL: <https://www.tradekorea.com/product/detail/P636834/Good-quality-Converter-Oxygen-Lance-Nozzle-for-water-cooled-.html> (дата обращения: 13.01.2020).
12. Пат. 40296 Украина, 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.; заявители и патентообладатели Днепродзерж. госуд. техн. ун-т и ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат». № 2000116633; заявл. 23.11.2000; опубл. 16.07.2001, Бюл. № 6.
13. Пантейков С.П. Пути совершенствования систем охлаждения наконечников верхних дутьевых фурм для крупнотоннажных конвертеров. *Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки)*: В 2 т. Днепропетровск: Системные технологии, 2000. Т.1. С.25-32.
14. Пат. 38980 Украина, МПК⁷ С 21 С 5/48. Фурменная головка повышенной жёсткости / С.П.Пантейков, Л.М.Учитель, В.В.Ивко и др.; заявитель и патентообладатель Днепродзерж. госуд. техн. ун-т. № 2000127287; заявл. 18.12.2000; опубл. 15.05.2001, Бюл. № 4.
15. Пантейков С.П., Пантейкова Е.С., Кадацкий Л.В., Старкова Е.А. Упрочнение сварных швов в фурменных головках. *Сталь*, 2017. № 12. С.28-35.

Поступила в редколлегию 03.03.2020.

УДК 669.162

DOI 10.31319/2519-2884.36.2020.2

КРЯЧКО Г.Ю., к.т.н., доцент
 КУЗНЕЦОВ М.С.*, співшукач
 ЧУБИНА О.А., к.т.н., доцент
 СТЕПАНЧЕНКО С.М., магістр

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське
 *ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат»

ВИЗНАЧЕННЯ ВИТРАТИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА ПРИ ЗБЕРЕЖЕННІ РІВНОГО ХОДУ ДОМЕННІ ПЕЧІ

Вступ. Оскільки головною метою застосування пиловугільного палива (ПВП) в доменній плавці є максимально можлива заміна дефіцитного коксу, то практика використання ПВП в умовах недостатньої компенсації його впливу зазвичай зводиться до наступного. Як правило, технологи встановлюють раніше випробуваний дуттьовий режим з максимальною витратою ПВП, за яким піч працює певний відрізок часу до перших ознак порушення рівного ходу. Затим витрата вугільного паливу скорочується, застосовуються традиційні засоби досягнення рівності ходу. Нормальна робота печі відновлюється, далі слідує чергова спроба підняття витрати ПВП. Тобто на нестационарність доменного процесу, обумовлену періодичністю випусків чавуну [1], накладається нестационарність, що створюється технологіями в пошуках оптимізації вдування пиловугільного палива. Це, в свою чергу, призводить до зниження як результативності, так і ефективності плавки.

Оскільки додаткове паливо, що слугує заміником коксу (пиловугільне паливо, природний газ, мазут, тощо), подається в горн доменної печі разом із дуттям, то його витрата є важливим параметром дуттьового режиму. Зазвичай використовують відносну