

Е.В. Протопопов¹, М.Н. Корвякова¹, А.Г. Чернятевич², С.В. Фейлер¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет

²Национальная металлургическая академия Украины

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ГОЛОВОК ЧЕТЫРЕХСОПЛОВЫХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ ДЛЯ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕДУВА

Многолетняя практика эксплуатации конвертеров с верхней продувкой [1] убедительно показала их достоинства, в том числе высокую производительность, возможность переработки чугунов различного химического состава, относительную простоту оборудования, достаточно высокую стойкость футеровки, возможность стабильного получения низкоуглеродистого сортамента металла.

В настоящее время практически все кислородно-конвертерные агрегаты работают с применением многоструйных фурм с соплами Лаваля, позволяющими достигать сверхзвуковых скоростей истечения, максимальной кинетической энергии струи кислорода, что обеспечивает глубокое проникновение дутья в расплав.

Количество сопел для многоструйной фурмы, как правило, выбирается в зависимости от садки конвертера, удельной интенсивности продувки и расстояния от уровня спокойной металлической ванны до горловины конвертера. В 70 гг. XX в. для конвертеров емкостью 300 – 400 т при интенсивности продувки 5 – 7 м³/(т·мин) рекомендовалось использовать фурмы с 9 – 12 соплами [2, 3]. Авторы работы [4] считают, что число сопел в фурмах большегрузных конвертеров не должно быть меньше семи. В длительных производственных исследованиях [2 – 6] на агрегатах различной емкости были опробованы фурмы с 8 – 13 соплами; получены хорошие технологические результаты, но фурмы показали низкую стойкость наконечников из-за сложности их конструкции и системы охлаждения последних, вследствие чего они и не были внедрены в постоянную эксплуатацию.

По общепринятому мнению [7] повышение количества сопел (обычно более шести) способствует увеличению степени усвоения кислорода, улучшению гидродинамической обстановки в ванне и ускорению шлакообразования, но вместе с тем приводит к переокислению ванны, выбросам, снижению выхода жид-

кой стали, особенно при производстве низкоуглеродистого полупродукта ($[C] \leq 0,05 \%$). При незначительном количестве сопел (обычно до пяти) вследствие увеличения «жесткости» дутья, как правило, ухудшаются условия шлакообразования, что приводит к интенсивному выносу металла из реакционной зоны, увеличению заматливания технологического оборудования и снижению выхода жидкого металла.

Имеется положительный опыт эксплуатации четырехсопловых фурм в 350-т агрегатах кислородно-конвертерного цеха 2 ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК», работающих с расходом кислорода на продувку ванны 700 – 1200 м³/мин. В таких условиях задачи выполнения производственной программы и обеспечения значительного объема производства низкоуглеродистого металла определяют необходимость оптимизации конструкции кислородных фурм, оптимизации дутьевого и шлакового режимов плавки с целью снижения окисленности металла и шлака при глубоком передувке ванны.

В соответствии с принятой технологией конструкция газоотводящих трактов конвертеров емкостью 350 т ККЦ 2 предусматривает отвод конвертерных газов с частичным их дожиганием в тракте при постоянной по ходу продувки производительности дымососа, т.е. без регулирования давления в камине. В реальных условиях производства в силу складывающихся производственных обстоятельств (колебания давления в кислородопроводе, необходимости подавления интенсивных выбросов металлошлаковой эмульсии из агрегата, проведения додувок с целью корректировки температуры и конечного химического состава полупродукта и т.д.) необходимо обеспечивать режимы продувки в широком (700 – 1200 м³/мин) диапазоне изменения расходов кислорода, и соответственно, режимы интенсивной продувки без дожигания, с частичным или полным дожиганием отходящих газов при стабильной работе

котла-утилизатора и газоочистки. В таких условиях обеспечить расчетный режим истечения газовых струй из сопел головки фурмы практически невозможно.

Как известно [8], при расчетном режиме истечения газа из сопла статическое давление на срезе сопла ($P_{\text{вых}}$) должно быть равно давлению окружающей среды ($P_{\text{окр}}$) на уровне сопла, в которую происходит истечение. В этом случае степень нерасчетности сопла $Z = P_{\text{вых}} / P_{\text{окр}} = 1$. Благодаря тому, что при расчетном режиме на срезе сопла отсутствует перепад давлений ($P_{\text{вых}} - P_{\text{окр}} = 0$), весь статический напор газового потока после критического сечения сопла переходит в скоростной, обеспечивая заданную дальность струй и динамическое давление потока на расплав. В связи с этим расчетному режиму соответствует строго определенная величина степени расширения сопла при заданном давлении кислорода перед соплом.

При давлении кислородной струи на срезе сопла больше или меньше давления окружающей среды имеют место случаи нерасчетного режима истечения газового потока и работы дутьевого сопла. Как известно [9], сопло работает в режиме недорасширения, если давление газа на срезе сопла превышает давление окружающей среды (т.е. $P_{\text{вых}} > P_{\text{окр}}$ и $Z > 1$). В этом случае расширение газа до давления окружающей среды продолжается за пределами сопла с образованием скачков уплотнения и разрежения в газовом потоке, в связи с чем происходят дополнительные потери энергии струи.

При небольших значениях разности давления ($P_{\text{вых}} - P_{\text{окр}}$) потери скорости из-за недорасширения компенсируют отсутствием потерь на трение на концевом участке сопла, что позволяет значительно уменьшить длину за критической части сопла.

Если же давление газа на срезе сопла меньше давления окружающей среды (т.е. $P_{\text{вых}} < P_{\text{окр}}$ и $Z < 1$), то сопло работает с перерасширением. При таком режиме истечения пограничный слой газовой струи отрывается от стенок и образует внутри сопла косой скачок уплотнений и зоны разрежения. Последнее обстоятельство сопровождается подсосом в сопло высокотемпературных газов с каплями металла и шлака, находящихся в рабочем пространстве агрегата, что приводит к быстрому разгару кромок сопла, искажению эпюры скоростей в сечении струи и прогару головки фурмы. Учитывая износ сопла и потери кинетической энергии истекающей струи, работу

дутьевого сопла в режиме перерасширения следует считать недопустимой.

В этой связи для повышения стабильности газового течения, характеристик параметров кислородных струй и предотвращения изменения геометрии дутьевого сопла вследствие разгара рекомендуется [9]:

- проектировать дутьевые сопла в соответствии с расчетной геометрией, удовлетворяющей фактическому состоянию кислородного потока перед соплом и заданному расходу кислорода;
- с целью предотвращения эрозионного износа выходного участка сопла в процессе эксплуатации проектировать укороченные дутьевые сопла, работающие в режиме недорасширения, с приемлемой степенью нерасчетности ($Z = 1,05 \div 1,10$).

В рассматриваемом в настоящей работе случае повышения стабильности характеристик кислородных струй, истекающих из четырехсопловой головки фурмы, можно достичь в результате:

- соответствия критического диаметра сопел расчетному значению с условием обеспечения верхнего предела расхода кислорода на продувку ванны 1200 м³/мин;
- соответствия выходного диаметра укороченных сопел Лаваля расчетному значению с условием продувки на нижнем пределе расхода кислорода 700 м³/мин;
- снабжения укороченного сопла Лаваля цилиндрическим насадком с условием обеспечения общей длины составного сопла в за критической части (расширяющийся и цилиндрический участки), равной длине расчетного сопла Лаваля при расходе кислорода 1200 м³/мин через четырехсопловую головку (рис. 1).

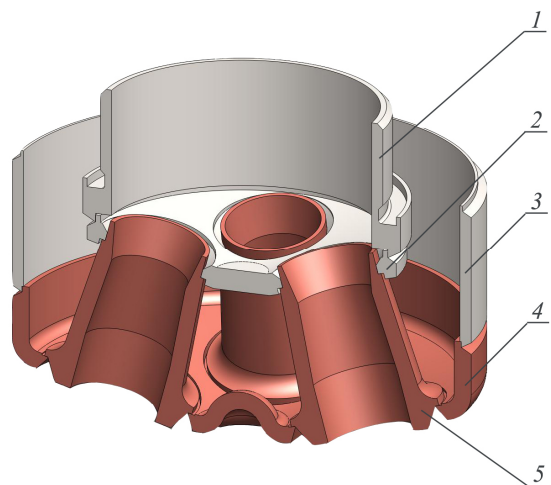


Рис. 1. Конструкция четырехсопловой головки кислородной фурмы с цилиндрическим насадком:
1 – штуцер; 2 – фланец; 3 – вставка; 4 – чаша; 5 – сопло

В результате обеспечивается работа составных сопел фурмы без возможного эрозионного износа закритической части сопла в диапазоне расхода кислорода 1200 – 700 м³/мин с приемлемой степенью нерасчетности. При этом цилиндрический насадок позволяет стабилизировать сверхзвуковой поток кислорода, увеличить длину начального и переходного участков струи (т.е. дальнобойность последней [10]), что важно с точки зрения организации «жесткой» продувки конвертерной ванны на завершающем этапе операции с целью снижения окисленности металла и шлака.

Для условий продувки в 350-т агрегатах ККЦ 2 предварительно выполнены расчеты и рабочее проектирование двух вариантов головок четырехсопловых кислородных фурм (рис. 2) при использовании измененного профиля закритической части сопла.

Поэтапные расчеты параметров газовых струй и профиля предлагаемых сопел включают в себя определение:

– максимального давления кислорода $P_{O_2}^{\max}$ перед соплами при максимальном $Q_{O_2}^{\max}$ его расходе 1200 м³/мин

$$P_{O_2}^{\max} = \frac{Q_{O_2}^{\max}}{1,06 F_{кр}} = \frac{1200}{1,06 \cdot 0,00916} = 123589,02 \text{ кг/м}^2 = 1,23 \text{ МПа};$$

– минимального давления кислорода $P_{O_2}^{\min}$ перед соплами при минимальном его расходе $Q_{O_2}^{\min}$ 700 м³/мин

$$P_{O_2}^{\min} = \frac{Q_{O_2}^{\min}}{1,06 F_{кр}} = \frac{700}{1,06 \cdot 0,004} = 72093,6 \text{ кг/м}^2 = 0,72 \text{ МПа};$$

– плотности кислорода перед соплами

$$\rho_{O_2}^{вх} = \rho_{O_2} \frac{T_0 P_{O_2}^{\max}}{P_0 T_{O_2}^{вх}} = 3903,9 \frac{P_{O_2}^{\max}}{T_{O_2}^{вх}} = 3903,9 \frac{1,23}{288} = 16,67 \text{ кг/м}^3;$$

– критической скорости истечения кислорода

$$W_{кр} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} R T_{O_2}^{вх}} = 17,4 \sqrt{T_{O_2}^{вх}} = 17,4 \sqrt{288} = 295,3 \text{ м/с};$$

– критерия скорости истечения газа (кислорода) при $P_{O_2}^{\max}$

$$\lambda_{\max} = \sqrt{\frac{\kappa+1}{\kappa-1} \left[1 - \left(\frac{0,14z}{P_{O_2}^{\max}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} = 2,45 \sqrt{1 - \left(\frac{0,14 \cdot 1,07}{1,23} \right)^{0,286}} = 1,65;$$

– максимальной скорости истечения кислорода на срезе сопла

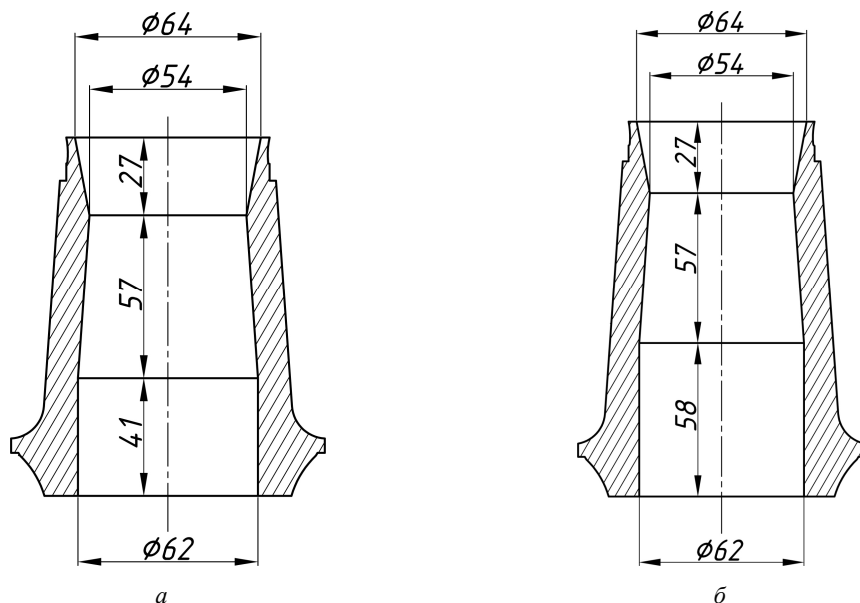


Рис. 2. Конструкция сопла Лаваля с укороченным (а) и удлиненным (б) цилиндрическим насадком

$$W_{\text{вых}}^{\text{max}} = W_{\text{кр}} \lambda_{\text{max}} = 295,3 \cdot 1,65 = 487,2 \text{ м/с};$$

– плотности кислорода на срезе сопла

$$\begin{aligned} \rho_{\text{O}_2}^{\text{вых}} &= \rho_{\text{O}_2}^{\text{вх}} (1 - 0,167 \lambda^2)^{2,5} = \\ &= 16,67 (1 - 0,167 \cdot 1,65^2)^{2,5} = 3,66 \text{ кг/м}^3; \end{aligned}$$

– плотности кислорода в критическом сечении сопла Лаваля

$$\begin{aligned} \rho_{\text{O}_2}^{\text{кр}} &= \rho_{\text{O}_2}^{\text{вх}} \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} = 0,634 \rho_{\text{O}_2}^{\text{вх}} = \\ &= 0,634 \cdot 16,67 = 10,57 \text{ кг/м}^3; \end{aligned}$$

– площади критического сечения сопла Лаваля в четырехсопловой головке

$$\begin{aligned} F_{\text{кр}} &= \frac{\rho_{\text{O}_2} Q_{\text{O}_2}^{\text{max}}}{60 W_{\text{кр}} \rho_{\text{O}_2}^{\text{кр}} n} = \frac{1,43 \cdot 1200}{60 \cdot 295,3 \cdot 10,57 \cdot 4} = \\ &= 0,00229 \text{ м}^2; \end{aligned}$$

– диаметра критического сечения сопла Лаваля в четырехсопловой головке

$$d_{\text{кр}} = 2 \sqrt{\frac{F_{\text{кр}}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0,00229}{3,14}} = 0,054 \text{ м};$$

– площади выходного сечения расчетного сопла Лаваля

$$\begin{aligned} F_{\text{вых}} &= F_{\text{кр}} \frac{1}{\lambda_{\text{min}}} \left(\frac{\frac{2}{\kappa + 1}}{1 - \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1} \lambda_{\text{min}}^2} \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} = \\ &= 0,00229 \frac{1}{1,65} \left(\frac{0,833}{1 - 0,167 \cdot 1,65^2} \right)^{2,5} = 0,00401 \text{ м}^2; \end{aligned}$$

– диаметра выходного сечения расчетного сопла Лаваля

$$d_{\text{вых}} = 2 \sqrt{\frac{F_{\text{вых}}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0,00401}{3,14}} = 0,071 \text{ м};$$

– длины докритической части расчетного сопла Лаваля

$$l_3 = \frac{d_{\text{вых}} - d_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{0,071 - 0,054}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{8}{2}\right)} = 0,115 \text{ м};$$

– длины докритической части расчетного сопла Лаваля

$$l_d = \frac{d_{\text{кр}}}{2} = \frac{0,054}{2} = 0,027 \text{ м};$$

– диаметра входной части расчетного сопла Лаваля

$$\begin{aligned} d_{\text{вх}} &= d_{\text{кр}} + 2 r_{\text{к}} \cos \frac{\beta}{2} - r_{\text{к}} \sqrt{3 + 4 \sin^2 \frac{\beta}{2} - 4 \sin^2 \frac{\beta}{2}} = \\ &= 0,054 + 2 \cdot 0,054 \cos \frac{8}{2} - \\ &- 0,054 \sqrt{3 + 4 \sin^2 \frac{8}{2} - 4 \sin^2 \frac{8}{2}} = 0,065 \text{ м}, \end{aligned}$$

$$\text{где } F_{\text{кр}} = \frac{n \pi d_{\text{кр}}^2}{4} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,054^2}{4} = 0,00916 \text{ м}^2$$

– общая площадь критических сечений сопел Лаваля четырехсопловой головки фурмы; n – количество сопел; $d_{\text{кр}}$ – диаметр критического сечения сопла; ρ_{O_2} – плотность кислорода при нормальных условиях ($1,43 \text{ кг/м}^3$); P_0 – атмосферное давление ($0,1 \text{ МПа}$); $T_0 = 273 \text{ К}$; $T_{\text{O}_2}^{\text{вх}}$ – температура кислорода перед соплами (288 К); $\kappa = 1,4$ – показатель адиабаты; $R = 8319/\mu$ – газовая постоянная, $\text{Н} \cdot \text{м}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; μ – молекулярная масса газа (для кислорода 32 кг); $z = 1,07$ – степень нерасчетности сопла; $\beta = 8^\circ$ – угол раскрытия сопла; $r_{\text{к}}$ – радиус скругления сопла Лаваля в докритической части (равный $d_{\text{кр}}$).

По конструктивным соображениям $d_{\text{вх}}$ принимается равным $d_{\text{кр}}$, при этом общая длина расчетного сопла Лаваля составит

$$l_0 = l_3 + l_d = 0,115 + 0,027 = 0,142 \text{ м}.$$

Критерий скорости истечения кислорода при $P_{\text{O}_2}^{\text{min}}$ составляет

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{min}} &= \sqrt{\frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{0,14z}{P_{\text{O}_2}^{\text{min}}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]} = \\ &= 2,45 \sqrt{1 - \left(\frac{0,14 \cdot 1,07}{0,72} \right)^{0,286}} = 1,47. \end{aligned}$$

Дальнейший расчет укороченного сопла Лаваля ведется по методике, предусматривающей определение размеров критического диаметра ($d_{\text{кр}}$) сопла по максимальному давлению кисло-

рода $P_{O_2}^{\max}$, а выходного диаметра ($d_{\text{вых}}$) сопла по величине $P_{O_2}^{\min}$, чтобы избежать отрыва струи и образования вихревых зон у стенок сопла и тем самым предотвратить износ кромок последнего.

В этом случае площадь выходного сечения укороченного сопла Лаваля будет определяться по выражению

$$F_{\text{вых}} = F_{\text{кр}} \frac{1}{\lambda_{\min}} \left(\frac{\frac{2}{\kappa+1}}{1 - \frac{\kappa-1}{\kappa+1} \lambda_{\min}^2} \right)^{\frac{1}{\kappa-1}} =$$

$$= 0,00229 \frac{1}{1,47} \left(\frac{0,833}{1 - 0,167 \cdot 1,47^2} \right)^{2,5} = 0,003 \text{ м}^2.$$

Диаметр выходного сечения укороченного сопла Лаваля составит

$$d_{\text{вых}} = 2 \sqrt{\frac{F_{\text{вых}}}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{0,003}{3,14}} = 0,062 \text{ м}.$$

Длина закритической части укороченного сопла Лаваля составит

$$l_3 = \frac{d_{\text{вых}} - d_{\text{кр}}}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} = \frac{0,062 - 0,054}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{8}{2}\right)} = 0,057 \text{ м}.$$

Общая длина сопла Лаваля с цилиндрическим насадком в закритической части (142 мм) включает укороченное сопло Лаваля ($d_{\text{вх}} = 64 \text{ мм}$, $d_{\text{кр}} = 54 \text{ мм}$, $d_{\text{вых}} = 62 \text{ мм}$, $l_{\text{д}} = 27 \text{ мм}$, $l_3 = 57 \text{ мм}$), рассчитанное на диапазон расхода кислорода 1200 – 700 м³/мин, и цилиндрический насадок длиной 58 мм.

С использованием разработанных конструкций дутьевых устройств в промышленных условиях проведены опытные кампании, позволяющие улучшить технико-экономические и качественные показатели плавки при производстве низкоуглеродистого металла.

Выводы. Разработана методика расчета параметров газовых струй и профиля сопел кислородных фурм для условий выплавки низкоуглеродистого металла в 350-т конвертере ОАО «ЕВРАЗ ЗСМК». Выполнены расчеты и рабочее проектирование двух вариантов головок четырехсопловых кислородных фурм при использовании измененного профиля закритической части сопла. Разработаны конструктивные решения, позволяющие обеспечить работу составных сопел фурмы безэрозионного износа

закритической части сопла с приемлемой степенью нерасчетности. Предложенные конструкции сопел кислородных фурм позволяют улучшить технико-экономические и качественные показатели плавки при производстве низкоуглеродистого металла.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б а п т и з м а н с к и й В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса. – М.: Металлургия, 1975. – 375 с.
2. Б а п т и з м а н с к и й В.И., Щ е д р и н Г.А. Расчет кислородно-конвертерных фурм // Сталь. 1973. № 1. С. 20 – 23.
3. Ф р и д л ь Э., Ш м и д т Г. Размеры кислородных конвертеров // Черные металлы. 1972. № 15. С. 40 – 45.
4. М и х а й л о в с к и й В.Н. Кислородно-конвертерные цехи ФРГ // Бюллетень «Черметинформация». 1973. Серия 6. Информационная 4. С. 1 – 44.
5. К о т т е д ж Д.П., Э к о л с Г.Л., Ш у п Д., Э н л е р К. Современные разработки многосопловых головок фурм для конвертеров ЛД и взаимосвязь между конструкцией головки фурмы и металлургическими результатами // Бюллетень НТИ «Черная металлургия». 1993. Вып. 1 (1125). С. 21 – 25.
6. T a b a t a Y., M a r s h R.C., K e l l y P. et al. – In book: Improvement of BOP Steel Refining Blowing Control using Wide Angle Lance Nozzles // Steelmaking Conference Proceedings. 1998. P. 451 – 457.
7. М е р к е р Э.Э., А к б и е в М.А., Я в о й с к и й В.И. и др. Продувка 250-т конвертерной ванны через восьмисопловую кислородную фурму // Изв. вуз. Черная металлургия. 1977. № 3. С. 39 – 42.
8. Я в о й с к и й В.И., Д о р о ф е е в Г.А., П о в х И.Л. Теория продувки сталеплавильной ванны. – М.: Металлургия, 1974. – 495 с.
9. Г о р б и к А.С., Б о б о ш к о В.С., Г р е в ц е в Л.М., С т р е т и н е р Е.М. Проектирование дутьевых сопел кислородных фурм. – В кн.: сб. науч. тр. ин-та «ВНИПИЧЕРМЕТЭНЕРГООЧИСТКА». – М.: Металлургия, 1971. С. 246 – 253.
10. В у р ц б а х Р. Характеристика свободных струй, истекающих из дутьевых сопел // Черные металлы. 1967. № 10. С. 12 – 20.

© 2013 г. Е.В. Протопопов,
М.Н. Корвякова, А.Г. Чернятевич,
С.В. Фейлер
Поступила 22 мая 2013 г.