



*The construction of the arc steel-furnace bay, the application of which allows to increase the speed of flush outflow, to provide reduction of the slag carry-over with metal, is offered.*

М. А. МУРИКОВ, РУП «БМЗ»,  
Д. Н. АНДРИАНОВ, ГГТУ им. П. О. Сухого,  
В. Н. ПРОХОРЕНКО, В. М. НОСОВЕЦ, РУП «БМЗ»,  
И. В. ГРИНКЕВИЧ, ГГТУ им. П. О. Сухого

УДК 621.74.043:669.715.021

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ С КОНОИДАЛЬНЫМ ЭРКЕРНЫМ ВЫПУСКОМ СТАЛИ

До конца 70-х годов во всем мире дуговые сталеплавильные печи (ДСП) строили с обычным традиционным выпуском металла в ковш через желоб, что связано с наклоном печи во время слива на угол до  $45^\circ$ . В связи с развитием сверхвысокомощных печей и необходимостью сливать металл из печи без шлака, а также переходом на слив стали из печи в ковш, установленный на сталевозе, потребовалось изменить схему выпуска металла так, чтобы получать короткую компактную струю и оставлять шлак в печи. В настоящее время получили развитие донный, сифонный и эркерный выпуски металла [1].

Эркерный выпуск металла является наиболее прогрессивным, так как он имеет свои преимущества: простота обслуживания донного отверстия и возможность слива металла из печи без шлака.

Степень уноса шлака с металлом дополнительно определяется эффектом завихрения во время выпуска. В электропечах, выпускающих высококачественные стали, практикуют различные пути для устранения эффекта завихрения. Один из них — система выпуска Fast фирмы «Fuchs Systemtechnik», которая применяется при выплавке качественных сталей на заводе фирмы «Edelstahlwerke Vuderus AG» [2]. Благодаря подобранному размеру прямоугольного выходного сечения в выпуске системы Fast эффекты завихрения предотвращаются.

Выпуск металла из ДСП происходит следующим образом: сталь проходит через стакан, а затем попадает во внешнюю среду. Поток жидкости, не ограниченный стенками и движущийся после выхода из насадки в воздушном пространстве, называется свободной струей. Перемешиваясь в процессе движения поверхностными слоями с воздухом, струя на определенном расстоянии от ковша теряет устойчивость и разрушается.

Поскольку протяженность устойчивого участка струи зависит от процессов, протекающих в насадке, рассмотрим их более подробно.

При входе потока в стакан происходит искривление линий тока и появление центробежных сил, отрывающих струю от внутренней поверхности насадки. Сжатие струи продолжается внутри стакана до определенной глубины, после чего поток снова расширяется, заполняя все поперечное сечение. Отрыв потока от стенок канала и связанное с ним вихреобразование создают в стакане зону пониженного статического давления и являются основной причиной увеличения сопротивления движению жидкости в струе, а также захвата струей воздуха.

Анализ истечения вертикальных струй показывает [3], что разливочные стаканы должны обеспечивать:

- истечение струи со стабильной скоростью истечения и постоянным расходом, чему удовлетворяют стаканы цилиндрической формы с большими радиусами закругления входной кромки;
- уменьшение турбулизации струи, для чего необходимо иметь минимальную высоту цилиндрической части стакана, определяемую стойкостью его при взаимодействии с жидкой сталью;
- получение максимальной скорости истечения и максимального расхода при заданных диаметре выходного сечения и напоре, для чего необходимо выходную часть стакана выполнять в форме диффузора с углом раскрытия не более  $6^\circ$  на сторону [4];
- уменьшение выходной скорости струи и силы удара струи о сталь-ковш, для чего в нижней части стакана необходимо сделать цилиндрическую полость большего сечения, чем подводящее отверстие насадки, а переходную часть — с оптимальным углом наклона  $7-9^\circ$ . [4].

В реальных условиях слива стали струя жидкого металла вследствие сопротивления воздуха, действия силы тяжести и внутренних сил, вызываемых вихревым и волновым характером движущейся жидкости, может деформироваться и даже распадаться [5–8]. При этом в струе могут образоваться три участка: сплошной участок устойчивого состояния струи; вибрирующий участок, в котором появляются нарушения сплошности; разорванный участок, в котором струя распадается на капли.

Состояние струи при разливке влияет на захват воздуха, вторичное окисление стали, содержание неметаллических включений, характер распределения затопленной струи в металле стальковша. Известно, что при ламинарном потоке окисление жидкого металла значительно меньше, чем при турбулентном истечении струи из печи.

Изучение процесса разливки стали на гидравлической модели [6] показало, что при входе в стальковш разорванного участка струи пузырьки воздуха, захваченные струей, резко гасят осевую скорость по мере удаления от уровня воды в модели. Всплывающие пузырьки создают вокруг струи интенсивные входящие потоки, которые, в свою очередь, создают циркуляционные потоки, идущие вниз вдоль стен стальковша.

Снижение осевой скорости струи в этом случае происходит гораздо интенсивнее, чем при распространении свободной струи, а зона интенсивной циркуляции проникает в жидкость на глубину не более 25–30 диаметров струи.

Форма стакана влияет на два основных параметра истечения жидкой стали: турбулентность струи и количество захватываемого воздуха, зависящих от геометрической формы и качества поверхности канала.

Исследованиями было доказано, что увеличение высоты цилиндрической части стакана и уменьшение радиуса его входной кромки не только увеличивают турбулентность струи и количество захватываемого воздуха, но способствуют также более интенсивному разбрызгиванию жидкости на стенки стальковша. Отрицательное влияние большой высоты цилиндрической части стакана связано с образованием и развитием гидродинамического пограничного слоя, толщина которого при увеличении длины стакана увеличивается. При этих условиях на поверхности струи, а затем в объеме жидкости, находящейся в стальковше, развиваются торообразные вихри, которые приводят к увеличению турбулизации струи и объема захватываемого воздуха.

Угловая скорость на поверхности вихря, где он соприкасается с потоком, равна скорости потока, а у оси вихря достигает максимума. По оси вихря возникает отрицательное статическое давление, в несколько раз меньшее, чем в движущейся струе.

Исследования процессов формирования кольцевых вихрей привели к выводу о том, что рассечение торообразного вихря на части в поверхностном слое струи способствует исчезновению кольцевых вихрей и получению более жесткой струи. Применение этого принципа конструирования привело к созданию разливочного стакана со специальными ребрами на внутренней его поверхности (рис. 1). Такой стакан обеспечивает получение более жесткой струи и снижение ее угла расходимости в атмосферной и затопленной части [4].

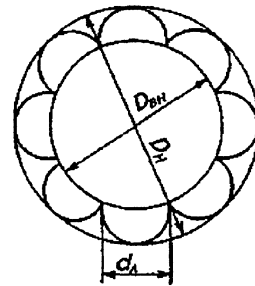


Рис. 1. Сечение канала стакана для уменьшения турбулизации струи

Второй проблемой получения качественной стали является предупреждение захвата покровного шлака дуговой сталеплавильной печи при сливе металла. В процессе выпуска металла на определенной высоте его уровня в печи формируется вихревая воронка, в которую интенсивно втягиваются частицы шлака и все имеющиеся нерастворимые частицы и примеси в стали [9]. Возникновение воронкообразной полости вращающегося металла связано с процессами вихреобразования при пересечении горизонтальных скоростей перемещения металла вдоль днища эркера и вертикальной скорости истечения.

Было проведено исследование зависимости критической высоты формирования вихря от размеров ковша, выпускного стакана, его местоположения, высоты уровня металла и других параметров разливки [10]. Изучение условий возникновения этого вихря привело исследователей к заключению, что по мере опускания уровня металла в ковше тангенциальная скорость вблизи стакана быстро нарастает и при достижении критического значения на открытой поверхности возникает открытая лунка. Высота появления вихревой воронки увеличивается с уменьшением диаметра разливочного стакана, не зависит от изменения диаметра ковша и слегка повышается при увеличении длины стакана  $h$ .

Недостатки существующей конструкции штатного эркера, используемого на РУП «БМЗ», заключаются в том, что:

- этот выпуск не обеспечивает полную отсечку шлака при сливе металла;

- выпуск имеет острую входную кромку (рис. 2), которая снижает коэффициент расхода и скорость истечения струи, а также создает турбулентный поток, который приводит к неравномерному износу эркерного отверстия;

- движение металла при сливе принимает (вихреобразную) спиралеобразную форму, что увеличивает протяженность движения молекул металла по каналу эркера и вследствие чего увеличивает время слива и износ эркера;

- при турбулентном потоке истечения и вихреобразования металла изменяется в большую сторону площадь поперечного сечения струи по мере удаления ее от эркера, что приводит к потерям тепла при сливе и увеличению площади контакта с атмосферой (рис. 2).

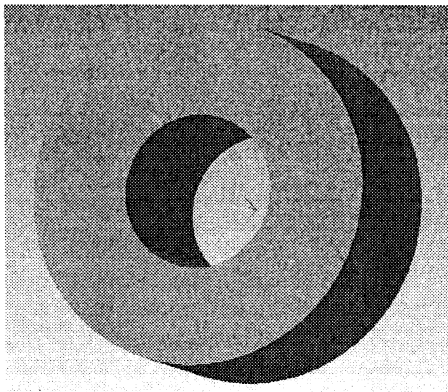


Рис. 2. Верхняя труба штатного эркера с острой входной кромкой

Опытное устройство для слива металла дуговой сталеплавильной печи, рассмотренное в данной работе, содержит коноидальное, прямоугольно-овальное сечение выпускного отверстия, которое предотвратит завихрения металла во время выпуска и за счет коноидальности увеличит коэффициент расхода и скорости истечения струи (рис. 3).

Система эксцентричного донного выпуска коноидального, прямоугольно-овального сечения выпускного отверстия обеспечивает значительное

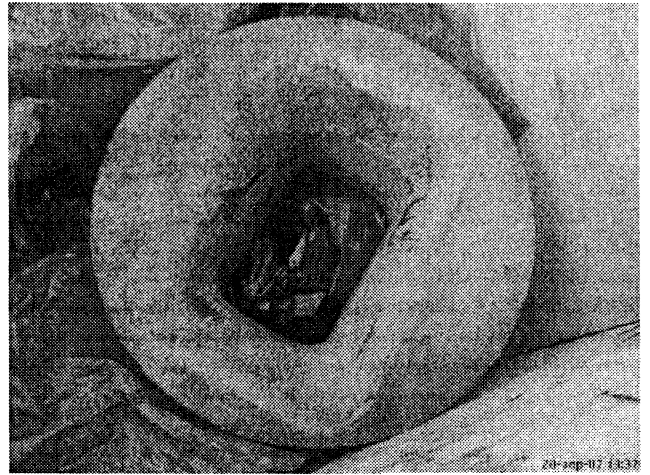


Рис. 3. Верхняя трубка опытного эркера

уменьшение уноса шлака с металлом. При обычном режиме работы с жидким шлаком такая конструкция является весьма надежной, поскольку контролировать следует только конечный шлак по скорости наклона печи.

Работу проводили в электросталеплавильных цехах №1 и 2 (ЭСЦ-1,2) РУП «БМЗ» при выплавке стали на всем выпускаемом сорimente.

При этом во время эксплуатации ДСП-2,3 с футеровкой канала эркерного выпуска, выполненной из опытных изделий, контролировали и фиксировали следующие технологические параметры: продолжительность выпуска металла из ДСП; падение температуры металла за время выпуска.

Для создания сравнительной базы по окончании эксплуатации опытной футеровки канала эркерного выпуска производили сбор данных аналогичных технологических параметров выпуска металла из ДСП при эксплуатации футеровки канала эркерного выпуска, выполненной из штатных огнеупорных изделий.

Футеровка опытного канала состоит из втулки, четырех средних трубок и одной верхней коноидальной трубки.

Физико-химические свойства опытного и штатного огнеупорных изделий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства опытного и штатного изделий

Изделие	Химический состав, %		Физические свойства		
	MgO	C	открытая пористость, %	плотность, г/см <sup>3</sup>	механическая прочность, Н/мм <sup>2</sup>
Опытный эркерный выпуск	> 76	> 14	< 4	> 3	> 35
Штатный эркерный выпуск	> 93	10-15	< 8	> 2,8	> 35

Были испытаны четыре опытных комплекта эркера, два на ДСП-2 и два на ДСП-3. Для определения падения температуры во время выпуска был выбран массив из 11 плавок стали марки СтЗсп, на которых испытывали опытный комплект эркера (табл. 2).

В качестве сравнительных выбран массив из 11 плавок стали марки СтЗсп, выплавленных при использовании штатного эркера (табл. 3).

Как видно из табл. 2, 3, на опытном эркере прослеживается снижение потерь температуры в связи с уменьшением площади контакта струи с атмосферой.

Таблица 2. Падение температуры во время выпуска на опытном эркере

Номер плавки	Температура выпуска, °С	Температура в сталь-ковше, °С	Разность температур, °С
22172	1696	1661	35
22230	1634	1549	85
22232	1655	1627	28
22233	1654	1579	75
22234	1712	1676	36
22255	1702	1622	80
22257	1709	1655	54
22258	1687	1654	33
22275	1588	1545	43
22280	1697	1624	73
22316	1683	1634	49
Среднее значение			53,7

Таблица 3. Падение температуры во время выпуска на штатном эркере

Номер плавки	Температура выпуска, °С	Температура в сталь-ковше, °С	Разность температур, °С
22456	1692	1650	42
22458	1641	1547	94
22459	1634	1529	105
22460	1663	1570	93
22461	1611	1519	92
22463	1638	1583	55
22464	1633	1585	48
22465	1686	1637	49
22466	1697	1653	44
22467	1622	1576	46
22468	1648	1594	54
Среднее значение			65,6

При эксплуатации просматривается равномерность износа эркера, коноидальность сечения сохранялась на протяжении всей работы эркера (рис. 4, 5). Средняя стойкость плавков с опытным эркером составила 135 плавков, средняя стойкость штатного эркера за 2006 г. – 104 плавки.

Для определения времени слива во время выпуска для опытного и штатного эркера был

выбран массив из 16 плавков с приблизительно одинаковым, средним отработанным количеством плавков эркера, массой плавки и температурой слива металла (табл. 4, 5).

Как видно из таблиц, на опытном эркере прослеживается снижение среднего времени слива металла в связи с коноидальным, прямоугольно-овальным сечением выпускного отверстия.

В результате проведения исследования было установлено, что при использовании опытного эркера уменьшились потери температуры при



Рис. 4. Состояние нижней катушки после 148 плавков

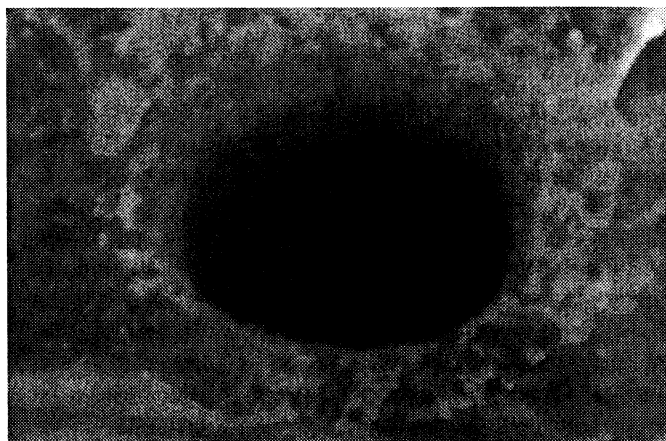


Рис. 5. Эркер, вид сверху после 136 плавков

Таблица 4. Продолжительность времени слива металла на опытном эркере

Дата	Номер плавки	Кол-во плавок эркера	Масса плавки	Температура выпуска, °С	Чистое время выпуска металла, мин
20.04.07	22172	3	110	1696	4,00
25.04.07	32072	7	104	1609	3,40
25.04.07	32073	8	110	1604	4,00
26.04.07	32093	28	105	1623	3,17
26.04.07	32099	34	108	1599	3,40
27.04.07	32120	55	108	1604	3,15
03.05.07	32241	58	114	1618	3,38
23.04.07	22230	61	118	1634	3,40
Среднее значение		32	109,6	1623	3,60

Таблица 5. Продолжительность времени слива металла на штатном эркере

Дата	Номер плавки	Кол-во плавок эркера	Масса плавки	Температура выпуска, °С	Чистое время выпуска металла, мин
20.04.07	31989	1	116	1550	6,00
23.04.07	32045	57	110	1626	3,50
23.04.07	32047	59	114	1625	3,20
23.04.07	32048	60	114	1712	3,00
24.07.07	33848	21	107	1620	3,42
24.07.07	33849	22	107	1634	3,49
24.07.07	33850	23	113	1644	3,58
24.07.07	33851	24	108	1657	4,36
Среднее значение		33	111	1646	4,00

сливе на 12 °С, средняя стойкость четырех комплектов опытных изделий канала эркерного выпуска составила 135,5 плавки, увеличение площади канала происходит в среднем на 0,7–0,8% за плавку и время слива металла снизилось на 24 с.

### Литература

1. Никольский Л.Е., Зинуров И.Ю. Оборудование и проектирование электросталеплавильных цехов. М.: Металлургия, 1993. С. 49–51.
2. Лопухов Г.А. Эффективные технологии электросталеплавильного производства // Новости черной металлургии за рубежом. 1997. №3.
3. Биркгоф Г., Сарантонелло Э. Струи, следы и каверны. М.: Мир, 1964.
4. Ефимов Б.А., Эльдарханов А.С. Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004. С. 22–65.

5. Ричардсон Э. Динамика реальных жидкостей. М.: Мир, 1965.

6. Яковлев Ю.Н. Гидравлическое моделирование наполнения изложниц спокойной сталью // Сб. науч. тр. Днепропетровского металлургического ин-та. Вып. XXXVII. Днепропетровск: Изд-во ДМИ, 1958. С. 174–184.

7. Лепицкий В.И., Яковлев Ю.Н. О влиянии условий подвода металла на качество поверхностных слоев слитков, отлитых в сквозные изложницы сифоном // Сб. науч. тр. Днепропетровского металлургического ин-та. Вып. XXXVII. Днепропетровск: Изд-во ДМИ, 1958. С. 10–17.

8. Лепицкий В.И. Теория и практика металлургии. 1939. № 4–5. С. 48–50.

9. Bommaraju R., Trump D., Chaubal P., Moore D. Ladle slag treatment for production of ultra-low steels, Steelmaking conference proceedings. 1993. P. 457–461.

10. Ramani Sankaranarayanan, Roderick I.L. Guthrie Laboratory Study of slag entrainment during the emptying of metallurgical vessels. Steelmaking conference proceedings. 1992. P. 655–663.