

4. Павлов, В. В. Влияние фракционного состава металлолома на показатели работы дуговой сталеплавильной печи [Текст] / В. В. Павлов, Ю. А. Ивин, С. В. Пехтерев [и др.] // Электromеталлургия. — 2011. — № 11. — С. 2–6.
5. Воронов, Г. В. Исследование взаимодействия струй компрессорного воздуха с поверхностью жидкой ванны [Текст] / Г. В. Воронов, С. Н. Гушин, Н. И. Кокарев [и др.] // Теплотехника процесса выплавки стали и сплавов: межвуз. сб. научн. тр. — Свердловск: изд-во УПИ, 1980. — С. 3–11.
6. Воронов, Г. В. Особенности гидродинамических процессов на поверхности жидкой ванны [Текст] / Г. В. Воронов, С. Н. Гушин, Н. И. Кокарев [и др.] // Совершенствование технологии и автоматизации сталеплавильных процессов: межвуз. сб. научн. тр. — Свердловск: изд-во УПИ, 1984. — С. 25–32.
7. Voronov, G. V. Aspects of the Aerodynamics in the Working Space of a Modern Electric Arc Steelmaking Furnace [Text] / G. V. Voronov, M. V. Antropov, O. V. Porokh // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — V. 55. — № 4. — P. 285–287.
8. Voronov, G. V. Temperature Conditions in the Working Space of a Modern Electric Arc Steelmaking Furnace [Text] / G. V. Voronov, M. V. Antropov, O. V. Porokh [et al.] // Ibid. — 2015. — V. 56. — № 3. — P. 257–259.
9. Voronov, G. V. Gas Dynamics in the Working Space of a Modern Electric Arc Steelmaking Furnace [Text] / G. V. Voronov, M. V. Antropov, I. V. Glukhov // Ibid. — 2015. — V. 55. — № 6. — P. 498–500.
10. Воронов, Г. В. Аэродинамика и тепловое состояние современной дуговой сталеплавильной печи [Текст] / Г. В. Воронов, В. А. Гольцев, И. В. Глухов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. — 2016. — № 1. — С. 28–34.

УДК 669.184

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ РАСПЛАВА В ВАННЕ КОНВЕРТЕРА С ВРАЩАЮЩИМСЯ КОРПУСОМ

*С. П. ЕРОНЬКО, д-р техн. наук, ersp@meta.ua;
Е. В. ОШОВСКАЯ, канд. техн. наук; Б. И. СТАРОДУБЦЕВ
(ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»)*

Основные технологические принципы проектирования конвертеров должны разрабатываться на основе положений гидродинамики, тепло- и массопереноса с учетом химического состава перерабатываемой шихты. В связи с особенностями решаемых задач и условий реализаций кислородно-конвертерного процесса нашли применение плавильные агрегаты верхнего, донного и комбинированного дутья. По данным зарубежных фирм, специализирующихся на разработке металлургического оборудования, использование донной продувки расплава в конвертере инертным газом позволяет получить ряд преимуществ: лучшие условия быстрого расплавления скрапа, повышение степени дефосфорации при одновременном снижении потребления обожженной извести, сокращение расхода алюминия и ферромарганца на раскисление стали, увеличение износостойкости огнеупорной футеровки за счет образования менее агрессивного шлака с низким содержанием оксида железа. При этом подачу инертного газа с расходом $0,1\text{--}0,2 \text{ м}^3/(\text{мин}\cdot\text{т})$ к нескольким (8–10) многоканальным продувочным фурмам или пористым блокам, размещенным в футеровке днища кислородного конвертера, осуществляют от рас-

пределительного блока по трубопроводам, проходящим через канал, выполненный в одной из опорных цапф плавильного агрегата [1].

Логично предположить, что донный способ продувки позволит повысить интенсивность перемешивания и в агрегатах с вращающимся корпусом, предназначенных для переработки шихты с повышенным содержанием вредных примесей, а также металлсодержащих промышленных и бытовых отходов [2]. Однако реализация способа вдувания газа через донные многосопловые фурмы в конвертере, корпус которого во время плавки наклонен под заданным углом к горизонту и совершает вращательное движение относительно своей продольной оси, требует разработки нового конструктивного исполнения продувочной системы. В связи с этим сотрудниками кафедры «Механическое оборудование заводов черной металлургии» Донецкого национального технического университета для данного типа конвертера была предложена система подачи инертного газа, позволяющая без использования дорогостоящих средств автоматики осуществлять донную продувку в допробойном режиме истечения энергоносителя с учетом изменяющейся глубины нахождения фурмы в жид-

кой ванне. Предложенная продувочная система (рис. 1) включает центральный газоподводящий трубопровод 1, газораспределительный узел 2 и несколько (3–4) многоканальных фурм 3, смонтированных в футеровке нижней конической части кислородного конвертера 4. Газоподводящий трубопровод, пропущенный через канал в боковой опорной цапфе конвертера, подведен к газораспределительному узлу, совмещенному с нижней опорной цапфой плавильного агрегата.

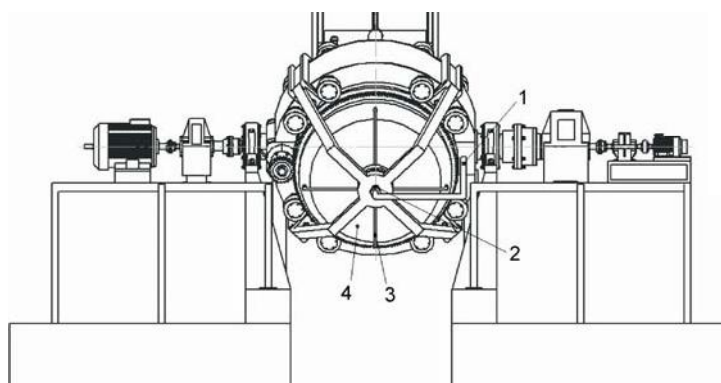


Рис. 1. Схема размещения предложенной продувочной системы на конвертере с вращающимся корпусом

Газораспределительный узел (рис. 2) содержит полу фланцевую цапфу 8, посредством болтов 2 с гайками 3 жестко закрепленную на днище 1 корпуса конвертера и установленную в роликовых подшипниках 7 и 10, размещенных в неподвижной опоре 11, связанной с помощью балок с несущим опорным кольцом плавильного агрегата. В полости цапфы 8 по скользящей посадке смонтирована гильза 9, имеющая на некотором удалении от своего переднего торца выполненную по нижней полуокружности профильную прорезь 4, расчетная ширина которой максимальна в средней части и плавно уменьшается к краям. Задний торец гильзы 9 с помощью фланца 12 жестко связан с корпусом неподвижной опоры 11 и крышкой 13 со штуцером 14, сообщающимся с газоподводящим трубопроводом 15. В корпусе полой цапфы с одинаковым шагом выполнены сквозные резьбовые отверстия, продольные оси которых находятся в ее поперечном сечении, совпадающем с осевой полуокружностью профильной прорези 4 гильзы 9. В указанные отверстия ввинчены штуцеры 5, посредством трубопроводов 6 связанные с продувочными фурмами, смонтированными на равном удалении по периметру на коническом участке футеровки, примыкающем к донной части корпуса конвертера.

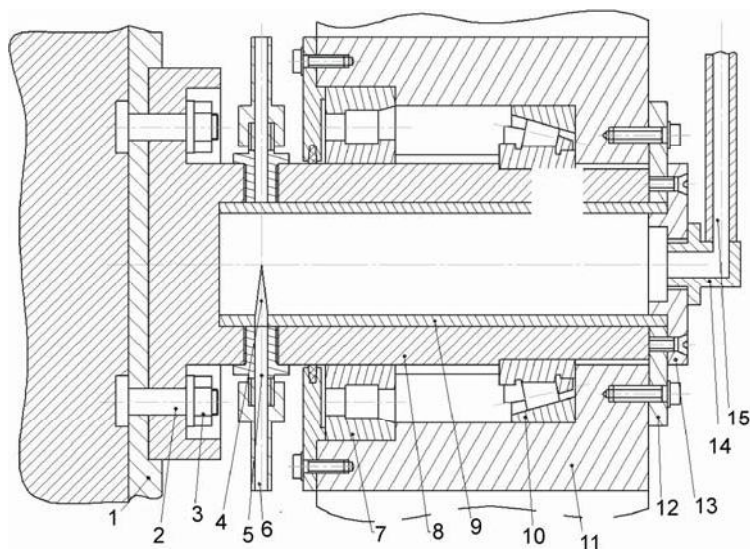


Рис. 2. Конструктивная схема газораспределительного узла

Принцип функционирования газораспределительного узла следующий. При вращении корпуса 1 сталеплавильного агрегата относительно своей продольной оси симметрии цапфа 8 будет поворачиваться в подшипниках 7, 10 относительно опоры 11 и жестко связанной с ней гильзы 9. Газ, подаваемый под давлением из трубопровода 15, через штуцер 14 попадает в полость гильзы 9 и далее через ее продольную прорезь 5 в канал трубопровода, штуцер которого в текущий момент совпадает с ней. Таким образом, газ в автоматическом режиме поочередно подается к каждой из продувочных фурм в промежутки времени, когда они находятся ниже уровня расплава в конвертере. При этом, благодаря переменной ширине прорези, расход газа пропорционально увеличивается по мере заглубления фурмы в расплав, достигая максимума в нижней точке ее погружения, а затем плавно снижается и в момент выхода фурмы из жидкой ванны его подача блокируется. Такой порядок работы продувочных фурм обеспечивает рациональное использование инертного газа и высокую эффективность перемешивания им металлического расплава благодаря исключению так называемого пробойного режима его истечения с учетом заглубления фурмы.

С целью проверки правильности принятых решений и качественной оценки повышения интенсивности перемешивания жидкой ванны в конвертере за счет ее продувки газом с использованием предлагаемой системы его подачи в расплав провели физическое моделирование исследуемого процесса. Для этого подготовили лабораторный комплекс (рис. 3), включающий объемную модель 10-т мини-конвертера 2 с прозрачным корпусом, наклоненным под заданным углом к горизонтальной плоскости и вращаемым

относительно продольной оси электромеханическим приводом с регулируемой частотой. Модель укомплектована газораспределительным устройством 5 предложенной конструкции. Масштаб модели и устройства по отношению к натуральным размерам проектируемого оборудования составлял 1:10. Подачу воздуха, имитировавшего аргон, к продувочным элементам 3 по трубкам 4, осуществляли компрессором 8 через ресивер 7. Давление воздуха на входе газораспределителя и его расход контролировали по показаниям манометра 9 и ротаметра 6. Фиксацию качественной картины процессов, протекающих на свободной поверхности жидкой ванны, осуществляли посредством видеокамеры 1, позволяющей просматривать отснятый материал в динамике и режиме “стоп-кадр”. Требуемую освещенность внутреннего пространства модели обеспечивали с помощью мощного светильника 10, размещаемого над ней.

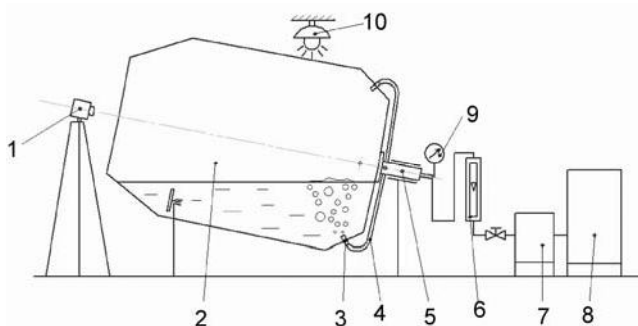


Рис. 3. Схема лабораторной установки

В соответствии с планом эксперимента в ходе выполненных исследований провели три серии опытов. В первой серии осуществляли визуальный контроль интенсивности бурления жидкой ванны в модели конвертера во время вращения ее корпуса с заданной частотой 5–15 об/мин при вдувании воздуха с расходом 0,5–2 л/мин под давлением 0,01 МПа.

На рис. 4 в качестве примера показаны характерные картины перемещения буруна по свободной поверхности жидкой ванны в направлении вращения корпуса модели мини-конвертера. Как видно на приведенных снимках, интенсивность перемешивания модельной жидкости изменяется в строгом соответствии с заглублением в нее продувочного элемента, что позволяет автоматически поддерживать режим продувки, исключая возникновение пробоя газовой струи сквозь толщу имитатора расплава. При этом можно не только обеспечить рациональное использование вдуваемого газа, но и сократить в 2 раза требуемое число продувочных элементов,

устанавливаемых в донной части плавильного агрегата.

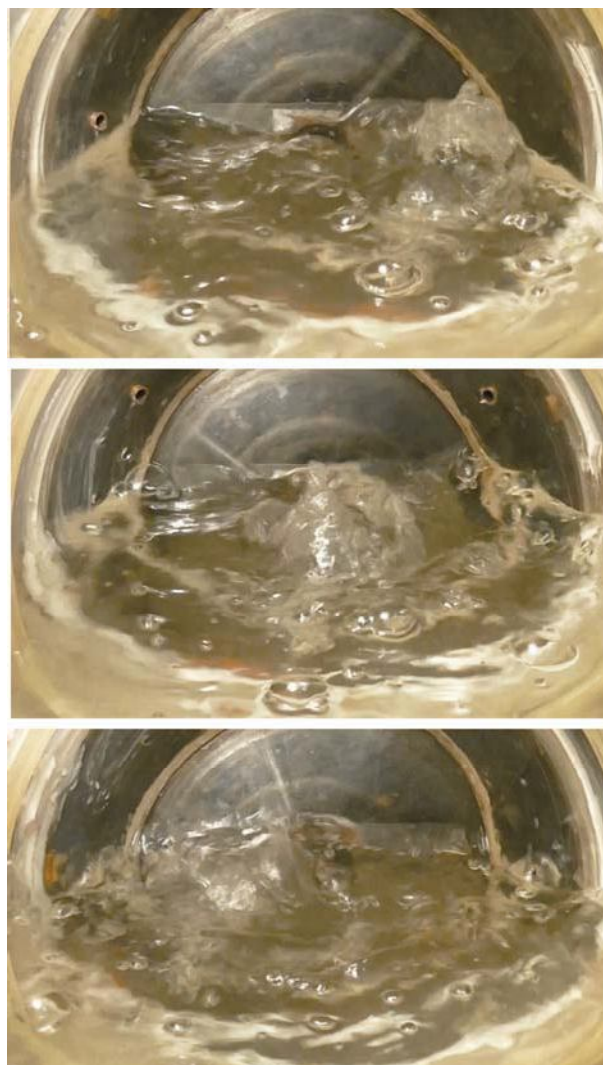


Рис. 4. Перемещение буруна на поверхности жидкой ванны при вращении корпуса модели конвертера

Учитывая то обстоятельство, что при выплавке стали в конвертере с вращающимся корпусом в состав исходной шихты может входить пакетированный лом с плотностью 3–4 т/м³ и обратный с плотностью 7,8 т/м³, во второй серии опытов провели моделирование процесса взаимодействия жидкого чугуна с твердыми компонентами шихты различной плотности в условиях реализации донной продувки расплава. При этом в качестве имитатора металлического лома использовали кубики из пенопласта, утяжеленные свинцовыми штифтами с таким расчетом, чтобы их усредненные плотности составляли 0,4–0,5 и 1,1 г/см³, т. е. находились в равных пропорциях с плотностью модельной жидкости (воды), равных соотношениям плотностей стального лома и жидкого чугуна, имеющего плотность 7 т/м³.

Видеофиксация процессов, протекающих в ванне модели сталеплавильного агрегата при нахождении в ней плавающих и погруженных элементов, имитирующих в масштабе 1:10 пакеты легковесного лома и куски оборотного лома (концевая обрезь непрерывнолитой заготовки), позволила установить следующие особенности взаимодействия газовой, жидкой и твердых фаз. При интенсивной продувке жидкой ванны плавающие на ее поверхности кубики, имитирующие пакеты легковесного лома, под действием циркуляционных потоков модельной жидкости отесняются к горловине модели конвертера и смещаются от ее продольной оси симметрии в направлении вращения (рис. 5). Кубики, имитирующие тяжеловесный лом, совершают челночное движение относительно внутренней поверхности модели плавильного агрегата, поднимаясь по ходу вращения ее корпуса от нижней точки на высоту, составляющую 0,3–1,0 глубины жидкой ванны, и затем соскальзывают вниз, не покидая зоны интенсивного перемешивания, возбуждаемого вдуваемым воздухом. Это свидетельствует о том, что интенсификация перемешивания расплава за счет инъекции газа через фурмы, совершающие движение относительно жидкой ванны, будет способствовать ускорению плавления в ней тяжеловесного металлического лома.

Поэтому третью серию опытов выполнили для оценки усиления интенсивности теплообмена за счет совмещения механического перемешивания ванны конвертера, осуществляемого путем вращения его корпуса, с инъекцией в нее газа через относительно движущиеся по окружности продувочные элементы.

Интенсивность процесса нагрева металлического лома и последующего его расплавления в ванне кислородного конвертера, как известно, зависит от большого числа факторов: долевого состава твердой и жидкой частей шихты и их начальной температуры, формы и размеров кусков или пакетов лома, мощности источников подводимого тепла, условий протекания теплообмена на границе раздела фаз, а также массопереноса в объеме, занимаемом жидкой фазой. Поэтому в данной серии опыты проводили при различных комбинациях отмеченных факторов с варьированием их значений. Температуру воды, имитирующей жидкий чугун, дискретно изменяли от 10 до 20 °С с интервалом 2 °С. Расход вдуваемого воздуха (имитатора аргона) назначали в пределах 0,5–2 л/мин при частотах вращения корпуса модели агрегата 5–15 об/мин. Доля имитатора

твердой части шихты в ее общем объеме составляла от 10 до 30 %.



Рис. 5. Характерные картины взаимодействия твердой и жидкой фаз в ванне модели конвертера при комбинированном ее перемешивании

В качестве оценочного критерия влияния донной продувки на интенсивность протекающих в перемешиваемой жидкой ванне теплообменных процессов использовали длительность таяния в ней кубиков льда при различных вариантах возбуждения циркуляции жидкости, моделирующей расплав. Для этого предварительно в модель конвертера помещали кубики льда, общая масса которых составляла 10–30 % от массы воды, заливаемой сверху и имеющей температуру в указанных выше пределах. Затем с помощью секундомера контролировали промежутки времени, в течение которого лед переходил в жидкую фазу при механическом и комбинированном способах перемешивания жидкостной системы.

Учитывая то обстоятельство, что теплофизические свойства твердых и жидких фаз в процессах плавления металлического лома в жидком чугуна и таяния льда в воде несопоставимы, полученные результаты моделирования являются качественными и подтверждают справедливость установленного факта — повышения интенсивности теплопереноса в модели конвертера при совместном использовании механического перемешивания ванны путем вращения корпуса

модели и газодинамического воздействия на модельную жидкость. Причем интенсификация обеспечивается при любом сочетании всех остальных учитывавшихся факторов, оказывающих влияние на теплообмен между взаимодействующими жидкой и твердой фазами, что иллюстрируют графики зависимостей, приведенные на рис. 6 и построенные при частоте вращения корпуса модели конвертера 5 об/мин.

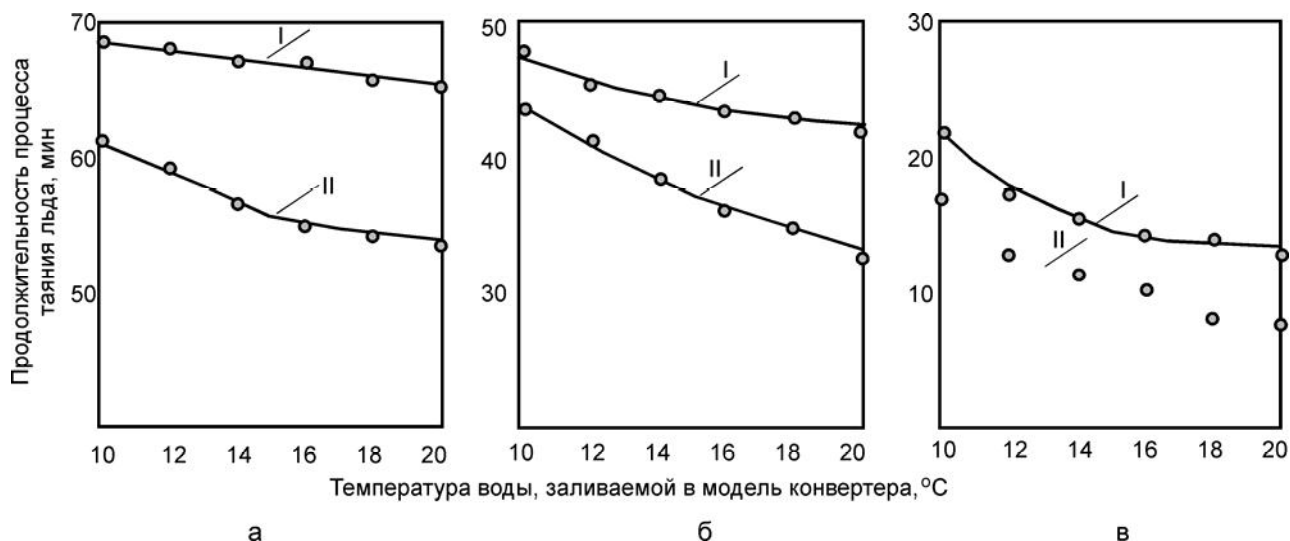


Рис. 6. Зависимость продолжительности таяния льда в модели конвертера от температуры заливаемой воды в случае механического (I) и комбинированного (II) перемешивания ванны при доле льда в ней 30 (а), 20 (б) и 10 % (в)

Для получения информации о влиянии продувки на процесс гомогенизации жидкости в ванне агрегата использовали оптический метод, суть которого состоит в том, что о времени полного перемешивания модельной жидкости судят по продолжительности распространения введенного красителя по всему объему жидкой ванны. Отсчет времени начинали с момента подачи первых порций цветной жидкости и заканчивали при полном рассредоточении ее в модели, что можно было наблюдать через прозрачные стенки корпуса. На рис. 7 показаны графики зависимости времени гомогенизации жидкости от интенсивности ее продувки воздухом в модели конвертера при различной частоте вращения корпуса, свидетельствующие о существенном влиянии инъекции газа на интенсификацию процесса массообмена.

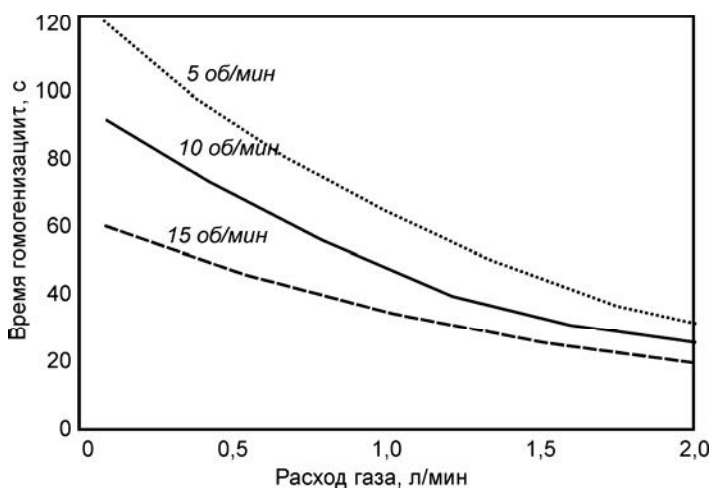


Рис. 7. Зависимость времени гомогенизации жидкой ванны модели конвертера при комбинированном ее перемешивании с различным расходом дувяемого воздуха и фиксированной частоте вращения корпуса модели

Результаты модельных исследований гидродинамических процессов, протекающих в ванне плавильного агрегата с вращающимся корпусом, позволили раскрыть механизм интенсификации тепломассопереноса при комбинированном перемешивании жидкостной системы. Возбуждаемые при вращении корпуса конвертера ламинарные потоки расплава инициируют движение вводимых в него твердых добавок только вдоль линий тока, что не позволяет достичь высокой интенсивности перемешивания жидкой ванны. Турбулизация потоков расплава при инжекции в него инертного газа вызывает перенос вещества в направлениях, пересекающих линии тока, т. е. перераспределение вещества в жидкостной системе происходит благодаря одновременному развитию двух процессов, возбуждающих объемные потоки и турбулентную диффузию. Следует отметить, что предложенная система инжекции газа в ванну конвертера

позволит также повысить скорость реакций, протекающих как в объеме металла, так и на границе шлак–металл при вдувании реагентов через верхнюю фурму с целью удаления нежелательных примесей. Совместное использование двух таких продувочных систем должно обеспечить идеальные условия, при которых коэффициенты массопереноса в зоне реакций будут иметь максимально возможные значения. Поэтому исследования в данном направлении, представляющие практический интерес, следует продолжить [3].

Полученная в ходе проведенных экспериментальных исследований информация послужит основой для разработки методик расчета конструктивных и технологических параметров продувочной системы, рекомендуемой к применению на мини-конвертерах с вращающимся корпусом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бойченко, Б. М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология [Текст] / Б. М. Бойченко, В. Б. Охотский, П. С. Харлашин. — Днепропетровск: РВА “Днепро–ВАЛ”, 2006. — 454 с.
2. Еронько, С. П. Мини-конвертер для переработки высокофосфористого чугуна [Текст] / С. П. Еронько, Д. И. Федяев, О. В. Афаунова [и др.] // *Металлургические процессы и оборудование*. — 2010. — № 3. — С. 40–46.
3. Еронько, С. П. Перспективы использования и проблематика создания мини-агрегата для переработки некачественной шихты и металлосодержащих отходов [Текст] / С. П. Еронько, Н. А. Климович // *Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”*. — 2016. — № 5. — С. 26–31.

Прокатное производство

УДК 621.771.237

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АНТИФРИКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ ПО ИХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ

*Я. Д. ВАСИЛЕВ, д-р техн. наук, профессор;
Р. А. ЗАМОГИЛЬНЫЙ, Д. Н. САМОКИШ
(Национальная металлургическая академия Украины)*

Плоский стальной холоднокатаный прокат является одним из наиболее востребованных видов металлопродукции. Благодаря хорошему сочетанию прочностных и пластических свойств, малой толщине (менее 1,5–2,0 мм) и высокому качеству поверхности из такого проката методами штамповки, гибки и сварки изготавливают легкие и прочные конструкции, которые находят широкое применение практически во всех отрас-

лях промышленности. Сегодня более 70 % плоского стального холоднокатаного проката, производимого в мире, выпускается толщиной 0,8–1,2 мм и менее с тенденцией дальнейшего ее уменьшения [1]. Одновременно с этим повышаются и прочностные свойства холоднокатаного проката, что приводит к увеличению энергосиловых параметров и удельного расхода электрической энергии при холодной прокатке.