

**В.А. Вихлевщук**, В.П. Пишпюк, В.Ю. Болотов, И.А. Павлюченков\*

### **ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ СТАЛИ НА АГРЕГАТЕ «КОВШ–ПЕЧЬ»**

Проведен анализ публикаций об использовании агрегата «ковш–печь» при производстве стали с низким содержанием вредных примесей. Показана целесообразность исследования технологии обработки стали с применением агрегата «ковш–печь» для получения металлопродукции высокого качества.

Ретроспективным анализом литературных данных о видах, технологических функциях и конструкциях АКOC в мировой металлургической практике установлено, что среди эффективных способов внеагрегатной доводки и повышения качества жидкой стали наиболее экономичным и распространенным в мировой практике является агрегат комплексной обработки стали (АКОС) типа «ковш–печь» (аббревиатура по международной терминологии – LF), созданный путем объединения установок комплексной доводки стали (УКДМ) с нагревательным модулем. В качестве нагревательного модуля, в основном, используется электродуговое устройство, работающее на переменном, реже – на постоянном токе [1–3]. Имеются сведения об использовании для подогрева металла плазмотронов [4–6], а также химического подогрева металла в ковше за счет тепла окисления алюминия подаваемым в рабочее пространство агрегата кислородом [7–8].

Первый экземпляр агрегата «ковш–печь» был сооружен в Японии в 1971г. Учитывая положительные результаты испытания этого образца, агрегаты «ковш–печь» начали создаваться и в других странах. В результате этого в 1986г. в разных странах (Япония, Германия, Франция, США и др.) в промышленной эксплуатации находилось более 200 агрегатов «ковш–печь» (из них около 150 – в электросталеплавильных и электросталелитейных цехах). В 1997г. в мире было уже 230 таких агрегатов [9]. По имеющимся сведениям [10], на зарубежных заводах сейчас с использованием агрегатов «ковш–печь» (АКП) производится комплексная обработка сталей разного сортамента в ковшах емкостью 25–250 т. При этом все строящиеся или модернизируемые сталеплавильные цехи металлургических предприятий оснащаются современными АКП.

До 1998г. на металлургических заводах Украины эти агрегаты отсутствовали. В последующие годы АКП были установлены на ОАО «Днепропетровский трубопрокатный завод, ОАО Днепрспецсталь», ОАО «До-

---

\* В подготовке материалов к публикации принимали участие Н.И.Лысенко, В.А.Бурштин, Д.А.Пинчук.

нецкий металлургический завод», ЗАО «ММЗ «Истил (Украина)», АО «НКМЗ» и Енакиевском метзаводе [11–13]. В странах СНГ АКП эксплуатируются на Волжском и Северском трубных, Белорусском и Молдавском металлургических заводах, ОАО «Тагмет», ОХМК, НТМК, ОЭМК, МЗ «Красный Октябрь», ПО «Ижорский метзавод» [13–17]. При этом преобладающее большинство АКП для всех упомянутых предприятий были закуплены по импорту. Опубликовано сообщение о том, что на ОАО «ММК» введен в эксплуатацию АКП, предназначенный для обработки металла в ковшах емкостью 370 т [18].

АКП предназначены для выполнения следующих технологических функций в заполненном сталеразливочном ковше:

- усреднение состава и температуры металла;
- корректировка (подогрев или охлаждение) стали;
- корректировка химического состава стали;
- глубокое рафинирование металла от вредных примесей высокоосновным синтетическим шлаком, формируемым из ТШС;
- модифицирование стали;
- корректировка окисленности стали;
- синхронизация работы комплекса «сталеплавильный агрегат – МНЛЗ»;
- длительное сохранение металла в ковше при аварийных ситуациях в цехе.

В состав АКП входят:

- специальный сталеvoz либо стенд с одним или двумя постановочными местами;
- водоохлаждаемая футерованная крышка;
- система подачи аргона и (или) индуктор для перемешивания металла;
- электрическое оборудование (трансформатор, электрододержатели, электроды, система регулирования);
- система бункеров и течек для подачи кусковых ферросплавов и компонентов ТШС;
- трайб–аппараты для ввода алюминиевой катанки и порошковой проволоки;
- приспособления для отбора проб металла из ковша, замера температуры и содержания газов в ковшевой ванне;
- приборы для экспресс–анализа проб металла и шлака;
- погружная фурма для обработки металла в ковше при аварийных ситуациях с донной(ыми) пористой(ыми) вставкой(ами) в нем;
- устройство для вдувания на зеркало металла порошкообразных материалов;
- система газоудаления и газоочистки;
- КИП и автоматика;
- машина (устройство) для скачивания шлака;

– пульт управления с системой АСУТП.

Проведен анализ имеющихся в литературе, на металлургических предприятиях и в проспектах инофирм схем и чертежей компоновки оборудования на АКП. Вызывает сомнение правильность и технологическая целесообразность принятого размещения течек для подачи компонентов ТШС, кусковых ферросплавов и для ввода порошковой проволоки и алюминиевой катанки с помощью трайб-аппаратов на импортных АКП. Представляется вероятным, что при этом не будет обеспечиваться быстрое попадание кусковых компонентов ТШС в район электродов нагревательного модуля для форсированного формирования синтетического шлака, а ввод прутковых добавок в околоруменную зону не обеспечит надлежащего усвоения корректирующих и модифицирующих материалов в связи с возможным изгибом и выносом на поверхность шлака алюминиевой катанки и порошковой проволоки интенсивным потоком расплава в зону всплывания аргоновых пузырей в ковше. Нет данных о конструкции и режимах работы машин (устройств) для скачивания жидкоподвижных шлаков из ковша перед обработкой на АКП. Несмотря на имеющиеся ограниченные сведения о расчетно-аналитическом обосновании электрической мощности нагревательного модуля для обеспечения требуемой скорости нагрева расплава на АКП [19,20], мало обоснованными и противоречивыми представляются данные о расходах электроэнергии и аргона для нагрева и перемешивания металла в ковше, а также расходах компонентов ТШС для формирования синтетических шлаков. Данные о конструкции оборудования, расходах газов и материалов на АКП для ковшей большой емкости в зарубежной периодической литературе не выявлены.

По результатам исследований и данным промышленной практики, при использовании АКП достигаются узкие марочные пределы и фактические колебания от плавки к плавке содержаний углерода (0,02–0,03%), марганца (0,1%), кремния (0,1%), хрома (0,1%), алюминия (0,02%), микролегирующих элементов (0,01%), понижение содержания серы, кислорода и фосфора, глобуляризация неметаллических включений, стабильная работа МНЛЗ, высокое качество, химическая однородность, физико-механические и служебные свойства металлопродукции, технологичность металла при переработке в металлопотребляющих отраслях [16,21].

Для комплексного получения металла с низкой газонасыщенностью и незначительным количеством неметаллических включений на ряде металлургических предприятий, в том числе отечественных, созданы комплексы «АКП – вакууматор» [2,22–24]. При этом достигнуты сверхнизкие содержания вредных примесей (0,001–0,003% серы, 0,003–0,007% фосфора, 0,0007–0,0010% кислорода, 0,0013–0,0017% азота, 0,00005–0,00015% водорода, 250–500 неметаллических включений по шкале MJDAS).

В ряде источников [11,15,16,23] подчеркивается важность надежной защиты металла от вторичного окисления для сохранения в металлопродукции уровня содержаний газов и неметаллических включений, достиг-

нутых в металле в стальковше.

Использование АКП обеспечивает значительное (1–2 дол. США без учета повышения производительности сталеплавильного комплекса и экономии легирующих материалов.) снижение себестоимости стали [25] за счет уменьшения продолжительности плавки в сталеплавильном агрегате более 25%, повышения степени усвоения элементов, снижения количества беззаказной продукции, уменьшения расхода энергетических ресурсов на 20%, повышения гибкости управления технологической линией производства стали, увеличения количества плавов в серии на МНЛЗ.

В большинстве литературных источников сообщается, что для работы АКП используется переменный ток (мощность трансформатора от 10 до 45 МВт) [1,10,13]. В то же время, по данным некоторых авторов [2,3], для этой цели выгоднее использовать постоянный. (прямой) электрический ток. Указывается, что при этом возможны значительные экономия электродов и огнеупоров, снижение содержания серы и водорода в полупродукте, стабилизация хода плавки, уменьшение уровня шума в цехе [13,26]. Данные о технологических параметрах доводки стали на АКП с электрическим модулем переменного тока в разных литературных источниках неполны и противоречивы; аналогичных сведений по АКП на постоянном токе практически нет. Отмечается только, что при использовании такого процесса возможен гальванический эффект удаления примесей из ковшевой ванны [3]. При комплексной обработке стали на АКП происходят сложные гидродинамические, тепло-, массообменные и физико-химические процессы. В опубликованных источниках имеются данные о гидродинамике расплава в наполняемом и заполненном ковше [27–29], полученные методом математического моделирования на плоских моделях и без учета теплового воздействия концентрированных источников энергии в виде электрических дуг. Имеются некоторые сведения [13] о трехмерном моделировании гидродинамики расплава в 235-тонном сталеразливочном ковше в зависимости от расположения донных продувочных пробок. Отсутствуют данные о температурных (тепловых) полях в ковшевой ванне в разные периоды обработки металла на АКП. Противоречивы рекомендации о параметрах работы энергетических модулей, последовательности операций в разные периоды обработки стали.

Процессы усвоения корректирующих и модифицирующих добавок в заполненном сталеразливочном ковше исследованы методом численного моделирования [30,31] без учета наличия намерзшей шлаковой оболочки между добавкой (кусок, проволока) и стальной оболочкой [32,33] также путем решения двухмерных задач.

Не выявлены данные о кинетике формирования синтетических шлаков из ТШС разного состава. Результаты физико-химических исследований взаимодействия сформированного синтетического шлака, корректирующих и модифицирующих добавок с железоуглеродистым полупродуктом в заполненном сталеразливочном ковше ограничены данными о дос-

тигаемом содержании вредных примесей в стали и величине усвоения добавок ковшевой взаимодействия сформированного синтетического шлака, корректирующих и модифицирующих добавок с железосодержащим полупродуктом в ванной [32,33]. Ограничены и требуют обновления и расширения сведения о технико-экономической эффективности выполняемых на АКП технологических процессов, влиянии обработки стали на качество металлопродукции. Нет ясности о целесообразности использования АКП на постоянном токе.

Согласно последним публикациям, в зарубежной практике начаты и интенсивно ведутся исследования в упомянутых направлениях, в том числе с использованием трехмерных математических моделей и других современных методов изучения качества металла и технологии его производства [34–36]. Но их результаты немногочисленны и пока неполные.

Все вышеуказанное не позволяет в настоящее время сформулировать типовые технологические рекомендации по параметрам ресурсосберегающей обработки стали разного сортамента на АКП, определить обобщенные технические решения по набору и конструкции оборудования этих агрегатов, особенно для ковшей большой емкости (160–350 т).

Решение этих задач требует выполнения комплекса исследований.

1. *Агрегат* внепечной обработки стали как средство создания современной технологической схемы производства стали / М.П.Галкин, В.С.Рыжкович, С.А.Иодковский и др. // Бюл. ин-та «ЦНИИ «Черметинформация». – 1977. – №9–10. – С 41–42.
2. *Нагрев* стали разрядом постоянного тока на установках внепечной обработки / Г.Н.Огороков, А.И.Донец, Ал.Г.Шалимов и др. // Сталь. –1994.–№5.–С.36–39.
3. *Первые* результаты опытной эксплуатации ковша–печи постоянного тока / Я.Л. Кац, М.Г. Королев, В.В. Рябов и др. // Труды Третьего конгресса сталеплавильщиков, Москва, 10–15 апреля, 1995. – М.: ОАО «Черметинформация», 1996. – С. 256–258.
4. *Перспективы* применения плазменно–дугового нагрева дугой в процессах комплексной внепечной обработки стали / Б.Е. Патон, О.С.Забарило, Ю.В. Латаш и др. // Проблемы спец. Электрометаллургии. – 1993. – № 4. –С.58–62.
5. *Создание* и освоение плазменного ковша–печи / М.Л. Жадкевич, Г.А. Мельник, О.С. Забарилло и др. // Проблемы спец. электрометаллургии. – 2000. – № 2. – С.45–47.
6. *Плазменная* внепечная обработка стали. / М.Л. Жадкевич, О.С.Забарило Материалы междунар. науч.–техн. конф. «Производство стали в XXI веке: прогноз, процессы, технология, экология. – Киев – Днепропетровск, 15–19 мая, 2000. – Киев, 2000. – С.358–362.
7. *Химический* подогрев стали в ковше / А.И. Агарышев, В.Я. Тишков, В.В. Ключай и др. // Металлург. – 1995. – № 12. – С.28–29.
8. *Разработка* технологии химического подогрева стали в ковше / Д.В. Захаров, М.К. Филяшин, А.И. Догман и др. // Труды Шестого конгресса сталеплавильщиков, Череповец, 17–19 октября, 2000. – М.: ОАО «Черметинформация», 2001. – С.80–81.
9. *Кац Я.Л.* Энергетическая эффективность нагрева стали при внепечной обра-

- ботке // Труды Четвертого конгресса сталеплавильщиков, Москва, 7–10 октября, 1996. – М.: ОАО «Черметинформация», 1997. – С.296–299.
10. *Общие* принципы создания и особенности конструкции агрегатов ковш–печь вместимостью 12–300 т / И.Ю.Зинуров, В.З.Фельдман, А.Д.Киселев и др. // Современные проблемы электрометаллургии стали: Матер. 11–ой международной конференции, посвященной 300–летию Уральской металлургии, Челябинск, 2001. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2001. – С.198–199.
  11. *Совершенствование* технологии выплавки подшипниковых и конструкционных сталей на ОАО «Днепроспецсталь» с обра–боткой металла на установке ковш–печь / Г.В.Кийко, С.С.Козаков, М.С.Вульфович и др. // Тр. Четвертого конгресса сталеплавильщиков, Москва, 7–10 октября, 1996. – М.: ОАО «Черметинформация», 1997. – С. 228–230.
  12. *Проектирование*, изготовление и монтаж установки ковш–печь в условиях действующего производства АО «НКМЗ» / Ю.Н.Белобров, А.И.Быковский, Г.В.Игнатенко и др. // Металлург. – 1998. – № 6. – С.35–36.
  13. *Производство* стали на агрегате ковш–печь / Д.А. Дюдкин, С.Ю.Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк: ООО «Юго–Восток, Лтд», 2003. – 300 с.
  14. *Освоение* технологии производства высококачественной стали в сверхмощных дуговых печах с обработкой в агрегате печь–ковш/ В.В. Фролочкин, В.Ю. Кузнецов, А.Я. Харламов и др. // Бюл. ин–та «ЦНИИЧерметинформация». – 1994. – № 3–4. – С.31–33.
  15. *Использование* установки ковш–печь в составе технологического цикла электросталеплавильного производства/ И.В. Деревянченко, В.А. Гоменюк, О.Л. Кучеренко и др. // Сталь. – 2001. – № 1. – С.26–29.
  16. *Киричков А.А.* Производство металла транспортного назначения в ОАО «НТМК» // Сталь. – 2000. – № 5. – С.65–67.
  17. *Опыт* эксплуатации установок печь–ковш в сталеплавильных цехах машиностроительных заводов / С.А. Иодковский, В.А.Новиков, В.С. Дуб и др. // Труды Первого конгресса сталеплавильщиков, Москва, 12–15 октября, 1992. – М.: ОАО «Черметинформация», 1993. – С.227–232.
  18. *Об опыте* эксплуатации установки печь–ковш в конвертерном цехе ОАО «ММК» / Р.С. Тахаутдинов, А.М. Бигеев, Ю.А. Бодеев и др. // Современные проблемы электрометаллургии стали: Матер. 11–ой международной конференции, посвященной 300–летию Уральской металлургии, Челябинск, 2001. – Челябинск: Изд–во ЮУрГУ, 2001. – С.229–234.
  19. *Численное* исследование плазменного нагрева стали в сталеразливочном ковше / Н.А. Свидунович, В.П. Пиптюк, С.Н. Капельян // Деп. в БелНИИНТИ 06.12.91, № 1006–Б 91. – Минск, 1991. – 17 с.
  20. *Оценка* тепловых затрат при плазменном подогреве стали в ковше / Н.А. Свидунович, В.П. Пиптюк, С.Н. Капельян и др.// Известия Академии наук Беларуси. – 1992. – № 2. – С.27–32.
  21. *Ковш*евая доводка стали В.А. Вихлевщук, В.С. Харахулах, С.С.Бродский – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
  22. *Кёте А.* Первая международная конференция по сверхчистым металлам и сплавам // Черные металлы. – 1995. – №9. – С. 18–22.
  23. *Освоение* технологии выплавки стали с использованием агрегата внепечной вакуумной обработки / В.С.Рымкевич, Е.В.Буцкий, В.И.Брагин и др. // Электрометаллургия. – 1998. – № 4. – С.25–28.

24. *Определение* параметров процесса рафинирования стали с ультранизким содержанием серы в ковше–печи / Jiang Zhou–hua, Zhang He–yan, Zhan Dong–ping and al // J. Northeast Univ. Natur. Sci.–2002.–23.–№10.– P.952–955.
25. *Ladle furnace puts end to ingots at Laclede steel* // Steel Times.– 1997. – 21.– №2.– P. 16–22.
26. *Эффективность* нагрева и десульфурации металла на установке ковш–печь постоянного тока / В.В. Рябов, В.И. Савченко, А.Я.Бунеев // Сталь. – 1996. – № 4. – С.27–30.
27. *Математическое* моделирование тепловых и гидродинамических процессов при продувке стали в ковше / В.И. Веревкин, С.Н. Калашников, С. Абрамович // Матем. и эконом. модели в операт. управлении производством. – 1997. – № 3. – С.24–27.
28. *Modeling of fluid flow conditions around the slag/metal interface in a gas–stirred ladle* / L. Jonsson, P.Jonsson // ISIJ Int. – 1996. – 36. – №9 – P.1127–1134.
29. *Математическая* модель гидродинамики расплава в заполняемом сталеразливочном ковше с учетом донной продувки металла аргоном / В.А. Вихлевщук, Ю.Н. Омесь, С.Е. Самохвалов и др. // Математическое моделирование. Научный журнал. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 1998. – № 3. – С.75–79..
30. *Численное* моделирование динамики усвоения микродобавок в заполняемом сталеразливочном ковше при донной продувке металла аргоном / В.А. Вихлевщук, Ю.Н. Омесь, С.Е. Самохвалов и др. // Математическое моделирование. Научный журнал. – Днепродзержинск: ДГТУ. – 1998. – №3. – С.79–82.
31. *Численное* моделирование процесса усвоения добавок порошковой проволоки и пруткового алюминия при внепечной обработке стали / В.А. Вихлевщук, В.Ю. Болотов, И.А. Павлюченков // Труды Шестого конгресса сталеплавыльщиков, Череповец, 17–19 октября, 2000. – М.: ОАО «Черметинформация», 2001. – С.375–379.
32. *Математическая* модель процесса растворения порошковой проволоки в жидкой стали при внепечной обработке в ковше / А.Ю.Никулин, Д.Х. Девятов, Н.А. Алфимова // Междунар. конф. «Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке», Москва, 6–10 июня, 1994. – Т.3. – М.: 1994. – С.65–69.
33. *Исследование* свойств синтетических шлаков, сформированных из рафинирующих смесей при внеагрегатной обработке стали / Э.В.Приходько, А.Ф. Хамхотько, В.А.Вихлевщук и др.//Металл и литье Укр.–1997.–№ 8–9.–С.9–10.
34. *Применение* шлаковых смесей для комплексного глубокого рафинирования металлических расплавов при внепечной обработке/ Ю.Н. Уточкин, А.В. Павлов, В.А. Менделеев // Труды Первого конгресса сталеплавыльщиков, Москва, 12–15 октября, 1992. – М.: ОАО «Черметинформация», 1993. – С.204–207.
35. *Heating and elec–tromagnetic stirring in a ladle furnace: A simulation model* / Alexis Jonas, Jonsson Par, Jonsson Lage.//ISIJ Int.–2000.–40.–№11.–P.1098–1104.
36. *Математическое* моделирование процесса нагрева на границе дуга–шлак в печи–ковше постоянного тока / Zhu Jie, Guo Hongzhi, Fu Jie. Beijing keji daxue xuebao // J. Univ. Sci. and Techn. Beijing.–1997.–19.–№3.–P.254–258.