

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ.

**В.С. Малиновский (НТФ "ЭКТА"),
В.Д. Малиновский(НТФ "ЭКТА"),
Л.В. Ярных (НТФ "ЭКТА"),
А.В. Афонаскин (ОАО "Курганмашзавод"),
П.Д. Андреев(ОАО "Курганмашзавод"),
В.Д. Князев(ОАО "Курганмашзавод"),
В.Д. Дороднов (ОАО "Курганмашзавод")**

Оборудование и технологии литейного производства большинства предприятий России в значительной мере устарело, характеризуется низкими показателями рентабельности и качества выпускаемой продукции, не отвечает современным требованиям экологов. Это в полной мере касается плавильного оборудования, физическая и моральная старость которого крайне негативно сказывается на основных показателях производства литья. Поэтому перед многими машиностроительными предприятиями стоит проблема скорейшей реконструкции, а правильный выбор нового оборудования и технологий определяет ее эффективность.

Для плавления и миксирования стали, специальных сплавов, чугуна, включая синтетический, для получения марок СЧ, ВЧ с высокими механическими свойствами, сплавов на основе алюминия и меди НТФ "ЭКТА" разработала типоряд дуговых печей постоянного тока нового поколения (ДППТНП) емкостью 0,5-40,0 т и готова провести разработку и поставку печей и миксеров большей емкости. Особенности конструкции и технологий ДППТНП описаны в [1]. Создание новых агрегатов, вместе с освоением технологии плавки и выдержки металла в них достигается двумя путями – реконструкцией действующих дуговых печей переменного тока (ДСП) и поставкой нового комплектного оборудования.

Реконструкция ДСП с переводом на питание постоянным током по методике НТФ "ЭКТА" и ее результаты описаны во многих публикациях (1, 2, 3). Промышленная эксплуатация ДППТНП подтвердила преимущества нового оборудования и технологий связанные с резкими уменьшением угара металла, графитированных электродов, ферросплавов, расхода электроэнергии, шума, пылегазовыбросов, обеспечившим соблюдение норм ПДВ и ПДК без строительства систем пылегазоочистки, сокращение затрат на производство металла, позволяющее обеспечить срок их окупаемости за период меньше года и двукратное и более увеличение производительности плавильных участков. Особо обратила на себя внимание значительное в 1,5 – 2 раза улучшение механических свойств изделий из металла выплавленного в ДППТНП. В настоящее время целесообразность замены ДСП на ДППТНП полностью доказана и подтверждена результатами промышленной эксплуатации [1, 2, 3].

В данной работе мы приводим наши доводы в пользу замены на ДППТНП индукционных печей и миксеров.

Индукционные плавильные печи (ИП) и миксеры долгое время по целому ряду показателей не имели конкурентоспособных аналогов среди других типов печей, включая ДСП, и получили широкое развитие, несмотря на наличие явных, очень серьезных недостатков.

Главным из недостатков ИП является принципиальная их взрывоопасность. В них металл плавится внутри водоохлаждаемой емкости, стенки которой отделены от расплава тонким слоем футеровки. В процессе работы всегда существует принципиальная возможность взрыва, поэтому развивать и эксплуатировать, очевидно, опасное оборудование допустимо только в случае острой необходимости, определяемой отсутствием технологических и прочих возможностей ИП у других взрывобезопасных типов печей. В том случае, если эксплуатационные и технологические характеристики других, взрывобезопасных печей, приближаются к характеристикам ИП, основным критерием выбора должна быть охрана труда.

Другим серьезным недостатком ИП является их технологическая пассивность, связанная с отсутствием возможности работы с горячими шлаками, ведения окислительного процесса, широкого выбора материалов футеровки определяемых не безопасностью эксплуатации, а требованиями технологического процесса.

К существенным недостаткам ИП следует отнести необходимость множества подзавалок шихты в расплав. В печах промышленной частоты плавки ведут с "болотом" и не допускается полный слив расплава, в ИП средней частоты полный слив проводится, однако в "сухую" печь загружается только первая порция шихты, а остальные материалы загружаются в расплав. Это вызвано тем, что плавильный объем ИП приблизительно равен объему расплава по окончании плавки, а объем шихты обычно на порядок больше объема расплава.

Проведем сравнение ДППТНП и ИП, учитывая, в том числе перечисленные выше недостатки.

В ДППТНП расплав находится внутри стального, неохлаждаемого кожуха, футерованного изнутри толстым слоем огнеупорных и теплоизоляционных материалов. Для подвода тока к шихте, в подине печи установлены подовые электроды, каналы водяного охлаждения которых вынесены за пределы кожуха, а внутри тела подовых электродов установлены датчики температуры [6]. Первое обеспечивает полностью взрывобезопасность печи, а второе защищает футеровку и подовые электроды от разрушения. Как и в ДСП, футеровка подины допускает горячие ремонты, ведение активных шлаковых и окислительных процессов при отсутствии специальных требований к футеровочным материалам, выбираемых только на основе требований технологов. Ресурс подины при плавке стали и чугуна до 3-5 лет, алюминиевых сплавов свыше 15 лет [3].

Технологические возможности ДППТНП в отличие от ИП позволяют вести все процессы, применяемые в ДСП, но в отличии от последних гораздо эффективнее. Это обеспечивается режимами плавления шихты и нагрева расплава без локального перегрева металла дугой [4] и активным разработанным впервые новым типом МГД перемешивания расплава металла и шлака [4,5].

Таким образом, в ДППТНП полностью реализованы возможности ИП, связанные с перемешиванием расплава и отсутствием локальных зон перегрева расплава, ранее сдерживающих во многих случаях использование ДСП. Технологические преимущества ДППТНП перед ИП очевидны и основные их них следующие.

ДППТНП позволяет использовать практически все классические методы обработки расплава, которые хорошо изучены и изложены в курсах теории металлургических процессов – дефосфорацию, десульфурацию, управляемое легирование, включая чугуна углеродом, дегазацию, управляемое насыщение металла газами, обезуглероживание, рафинирование, удаление из металла неметаллических включений, мощное диспергирование остающихся, рафинирование. Все процессы ведут с мощным и управляемым перемешиванием, обеспечивающим равномерное распределение по объему ванны расплава химсостава и температуры, высокую эффективную поверхность взаимодействия металла и горячего шлака. Ниже будут приведены таблицы с результатами исследования металла, выплавляемого в промышленных ДППТНП с характеристиками недостижимыми в ИП без использования специальных, как правило, дорогих и экологически вредных элементов. Но главным экономическим преимуществом ДППТНП является возможность выплавки любых марок стали, чугуна, алюминиевых и медных сплавов с использованием не дорогих, чистых, специально подготовленных материалов для плавки в ИП, а рядовой шихты.

Способы загрузки шихты в ИП и ДППТНП отличаются принципиально и в значительной мере влияют на безопасность работы, затраты на энергоресурсы, подготовку шихты, экологию. В ДППТНП объем печного пространства соответствует объему переплавляемой шихты. Обычно завалку печи ведут в один прием, и только при очень легковесной шихте проводят одну или несколько подзавалок, в период, когда в печи мало расплава.

Это позволяет не проводить специальной подготовки шихты, не вызывает опасений завалка влажной шихты с кусками льда, СОЖ, больших габаритов и ультралегковесной, т.е. не требуется затрат энергии на подогрев шихты, ее резку, прессование.

В отличие от ИП в ДППТНП печные газы внутри печи разогреты до высокой температуры, не разбавлены воздухом и при выходе из печного пространства самовоспламеняются. В ИП при наличии в шихте органических элементов, отходящие газы необходимо разогревать источниками энергии для их дожигания. При плавлении твердой шихты в ДППТНП атмосфера печи содержит большое количество возгонов органики и монооксида углерода, защищающие металл от окисления, а расплав закрыт шлаком. В этих условиях, угар шихты значительно в 3-4 раза ниже угара шихты в ИП, в которых поверхность твердой шихты в процессе расплавления не защищена от взаимодействия с воздухом, а расплав не защищен шлаком. При плавке в ДППТНП многие окислы, ушедшие в шлак, восстанавливаются углеродом из металла или специально загруженным карбюризатором. В ИП эти процессы не идут.

При нагреве шихты в ДППТНП с поверхности, а не изнутри, как в ИП, в направлении градиента температуры из металла уходят газы, а неметаллические включения при стекании капель расплава через шлак, в основном, остаются в нем. Эти процессы, особенно при плавлении алюминиевых сплавов, способствуют глубокому удалению водорода из металла, когда как при плавлении в ИП, как и в печах других типов, алюминий водородом насыщается.

Производительность процесса плавки в печах определяется возможностями рационального введения энергии с высокой удельной мощностью. В ИП промышленной частоты мощность ограничена чрезмерным перемешиванием и составляет 300-360 кВт. В ИП средней частоты этот недостаток преодолен, и скорость плавления определяется только технико-экономическими показателями. В ДППТНП ограничение подведенной мощности также отсутствует, и мы задаем параметры источников электропитания обеспечивающих время расплавления черных металлов 35-45 минут и алюминиевых сплавов 15-20 минут.

Выше было отмечено, то, что более низкий уровень угара шихты в ДППТНП, высокая температура отходящих из печи газов и высокая концентрация углеводородов в них обеспечивают меньшие затраты на пылегазоочистку в ДППТНП в сравнении с ИП. К тому же результату приводит отсутствие необходимости подогрева и резки шихты перед загрузкой в ДППТНП, в отличие от ИП, для которой, как правило, эти операции проводятся с использованием химического топлива. К большим загрязнениям окружающей среды ИП приводит использование фторо-хлоросодержащих элементов, редкоземельных и др. металлов и соединений которые необходимы для дегазации расплава при производстве алюминия, удаления серы при производстве чугуна внепечной обработки стали и сплавов. При производстве высококачественного металла в ДППТНП в использовании экзотических дорогостоящих технологических процедур и материалов необходимости нет.

Удаление вредных примесей ведется с использованием классических технологий, веками отработанных на металлургических агрегатах.

Экономические показатели печей складываются из удельного расхода электроэнергии, в ДППТНП – графитированных электродов и шлакообразующих материалов. В ИП - флюсов, химических реагентов, инертного газа, чистых шихтовых материалов, затрат на подготовку шихты, очистку пылегазовыбросов и захоронения твердых отходов.

Эти показатели для ДППТНП приводятся на основе опыта эксплуатации дуговой печи постоянного тока емкостью 6 т при производстве марганцовистой стали и чугуна. Так в октябре 2001 г. при работе в две смены, с двумя выходными днями и частыми простоями печи (10 плавов в две смены со средним временем плавки менее 1 часа) удельный расход электроэнергии, определенный делением месячного расхода электроэнергии на произведенный жидкий металл составил менее 550 кВт.ч на тонну. В результате выпускался металл, практически не требующий дальнейшей доводки.

На ряде плавов марганцовистых сталей в "горячей" печи удельный расход энергии достигал 400 кВт.ч/т. Эти показатели значительно превышают показатели ИП средней частоты – 550-600 кВт.ч/т при непрерывной работе и в разы меньше расхода электроэнергии в ИП промышленной частоты, работающей в сопоставимых условиях – от 900 до 2500 кВт.ч/т. Затраты на графитированные электроды – 1,4 кг/т расплава эквивалентны по стоимости расходу электроэнергии 45-60 кВт.ч/т и перекрываются расходом энергии для подготовки, резки, нагрева шихты перед плавкой в ИП и на внепечную обработку.

Очевидно, что стоимость шлакообразующих материалов для ДППТНП – извести и шамотной крошки при производстве качественных металлов значительно ниже стоимости реагентов для ИП.

Для плавки в ДППТНП используется шихта "из вагонов" без особых ограничений в содержании серы, фосфора, размера кусков, загрязнений неметаллическими материалами, при плавке, которой угар металлической части лежит в пределах 0,5-1,5 %. Угар легирующих элементов при переплаве или выплавке высоколегированных марок стали, например, стали 110Г13Л практически отсутствует [2]. Качественные показатели выплавленных металлов будут приведены ниже. В ИП для производства марочного металла необходимо загружать шихту, качество которой, как правило, должно превышать качество выплавляемого металла. К шихте предъявляются особые требования по содержанию серы, фосфора, углерода, органических и неметаллических загрязнений, газов, размерам кусков, т.е. шихта для ИП, как правило, значительно дороже шихты для ДППТНП, а ее потери при плавлении и обработке выше.

Отходы производства, особенно при выплавке алюминиевых сплавов в ИП содержат хлорофторосодержащие элементы и со шлаком теряется значительное количество переплавляемого металла. Этих недостатков практически лишены ДППТНП.

Эффективность ДППТНП подтверждается опытом промышленной эксплуатации на машиностроительных предприятиях.

Так на ОАО "Курганмашзавод" более 1,5 лет работает агрегат ДППТ-5АГ, состоящий из двух плавильных емкостей и одного источника электропитания выполненной методом перевода двух печей ДС-5 М емкостью 5 т. На ней освоено серийный выпуск ряда марок стали и чугуна.

Запуск агрегата позволил решить ряд проблем ограничения уровня пылевыбросов ниже санитарных норм без строительства системы пылегазоочистки. Так замеры выбросов при плавке стали 110Г13 Л показали следующие результаты:

	Выбросы г/с	ПДВ г/с
пыль	0,3301	0,9853
в том числе Mn	0,0266	0,1486

Наилучший результат по расходу электроэнергии был получен – 392 кВт.ч/т, при стабильной работе расход электроэнергии составляет 450 кВт.ч/т.

Средний расход графитированных электродов составляет – 1,39 кг/т. После перевода ДС-5М на питание постоянным током угар шихты уменьшился с 6,0-6,5 % до 0,5-1,0 %. Это дает экономии металла 50-60 кг/т, ферромарганца – 11,6 кг/т.

Отмечено значительное увеличение механических свойств стали 110Г14Л. В ДСП при твердости металла НВ 255...269 стрела прогиба составляла 2,5-2,8, бал аустенитного зерна 2...3. В ДППТНП при НВ 266, стрела прогиба – 3,6...4,4, бал аустенитного зерна – 1.

При выплавке сталей типа Ст 30ХМЛ процессы рафинирования протекают стандартно с более высокими скоростями удаления фосфора и серы. Особенно высока скорость обезуглероживания при рудном кипении, которая составляет 0,1 % в течении 3-5 минут. Эти преимущества привели к значительному повышению механических свойств литых заготовок для нефтегазовой аппаратуры.

На ОАО "Курганмашзавод" на дуговых печах выплавляют серые чугуны марок от СЧ15 до СЧ-30 включительно с содержанием перлита от П45, Ф55 до П в СЧ 30.

Плавка исходного чугуна для ВЧ осуществляется в печи с основной футеровкой. В ДППТ процесс десульфурации вследствие перемешивания расплава и его активного взаимодействия со шлаком, основность которого выше 2,0 значительно облегчился и ускорился. В результате мы всегда имеем содержание серы менее 0,01 %. Это позволяет уменьшить расход магниевой лигатуры до 1,0-1,2 %. Чугун с содержанием элементов С=3,58; Si=2,13; Mn=0,68; S=0,007; P=0,06; Cr=0,17; Ni=0,05 имеет предел прочности 60,6 кг/мм², а относительное удлинение 8,4 %. Таким

образом, плавка в ДППТ позволяет значительно повысить пластичность СШГ при одновременном возрастании механических свойств. Угар металла при плавке составляет 0,5-1,0 %.

Переплавление отходов чугуна в виде 100 % стружки с составом основных элементов по ТУ – С=3,10-3,30%; Si=1,8-2,0, Mn=0,30-0,80 %; S \geq 0,05%; P \leq 0,20% выявил практическое отсутствие угара металла и легирующих элементов. После переплавки чугун включал в себя следующие основные элементы: С=3,60%; Si=2,28%; Mn=0,4%; S=0,007%; P=0,11%.

Превышение значений содержания элементов требованием ТУ определено соответствующими отклонениями состава исходной шихты. При этом произошло стандартное для ДППТНП снижение содержания серы и фосфора.

На ДППТ освоена выплавка более 150 марок стали и сплавов различного назначения [1]. Из наиболее сложных сталей следует отметить сталь 02Х8Н22С6; высокопрочную сталь 03Н17К10В10Н-ПД; высокобористую сталь, дисковый жаропрочный сплав третьего поколения. Комплексное изучение металла подтвердило его соответствие требованиям стандарта ДИН17440. Технические возможности ДППТНП позволили в первые в мире освоить в них выплавку высококачественных алюминиевых сплавов [1]. Так на Ковровском электромеханическом заводе с 1987 года работает печь ДППТ-0,5 емкостью 0,5 т, которая заменила четыре печи ИАТ-0,4. К настоящему времени литейный цех оснащен двумя печами и готовится к пуску третьей. За 15 лет ни разу не проводилась замена футеровки подины. Как и все ДППТ, данные печи работают в одну-две смены, не боятся внезапных отключений электроэнергии, чрезвычайно мобильны. На них производятся отливки из сплава АК7ч, полностью удовлетворяющие требованиям ГОСТ 1583-93 и значительно превосходящие их по механическим свойствам. В литом, термообработанном состоянии на отлитых в металлическую форму образцах получили $\sigma \geq 216$ МПа, $\delta \geq 2$ %, НВ>60, а на образцах, вырезанных из тела отливки, $\sigma_{в} \geq 317$ МПа, $\delta \geq 9$ %, НВ $\geq 94,9$. Содержание водорода - 0,1...0,2 см³/100г металла, пористость отливок соответствует 1 баллу. Пятикратные переплавы сплава АЛ9 с использованием 100 % стружки и 100 % возврата, выполненные по экспериментальной программе показали, что достигнутые при первом переплаве свойства $\sigma \geq 172...175$ МПа, $\delta \geq 4,1...4,6$ %, НВ>60-63, содержание водорода ~ 0,3 см³/100г в дальнейшем остались неизменными.

Специалистами Заволжского моторного завода на печи КЭМЗ были проведены плавки моторного лема АК9ч из которых не удалялись детали на основе железа. Полученный сплав соответствует ГОСТ 1583-93 и значительно (в 1,5-2 раза превышает требования к механическим свойствам, имеет содержание водорода 0,14 см³/100г, газовую плотность соответственно 1 баллу или ее отсутствие).

В заключение можно привести множество других примеров, показывающих, что по своим возможностям при плавке стали, чугуна, всевозможных сплавов ДППТ значительно превосходят ИП по технико-экономическим и экологическим показателям или реализуют технологии, провести которые на ИП нельзя.

Далеко не все технологии нами отработаны, открыт путь для разработки новых технологий и расширения возможностей оборудования ДППТНП. В тоже время в мире работают и производятся тысячи ИП, технологические процессы, на которых разрабатывают множество специалистов. Отработаны технологии и оборудование сопоставимые с великими произведениями искусства, тогда как ДППТНП находятся в начале пути. Они уже работают, в соответствии с ясными Законами, очень надежно и на них, поэтому легко достигаются высокие показатели, в основу получения которых заложена классическая теория металлургических процессов, результаты исследований магнитной гидродинамики, теплотехники, теплофизики, электротехники и других современных дисциплин.

Установка ДППТ на предприятиях создает условия для превышения мировых показателей плавки, тогда как оснащение предприятий ИП, в настоящее время, производимых в основном иными фирмами ведет к повторению пройденного другими пути с большим или меньшим отставанием. Но главное то, что ДППТНП в отличие от ИП взрывобезопасны и не побуждают создавать рискованные производства.

Список литературы:

1. В.С. Малиновский, Л.В. Ярных "Дуговые печи постоянного тока нового поколения", *Металлургия машиностроения* № 2, 2000 г. с. 2-13.
2. А.В. Афонаскин и др. "Результаты первого этапа освоения плавильного агрегата постоянного тока нового поколения на ОАО "Курганмашзавод", *Литейное производство* № 11, 2000 г. с. 20-23.
3. В.С. Малиновский и др. "Опыт промышленной эксплуатации дуговой печи постоянного тока для плавки алюминиевых сплавов, *Литейное производство* № 5, 2001 г. с. 32-35.
4. В.С. Малиновский "Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления" Пат. РФ 2164450.
5. В.С. Малиновский и др. "Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления" Пат. РФ № 2048662.
6. В.С. Малиновский "Подовый электрод электропечи" Пат. РФ № 2112187