

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПЛАВКИ СТАЛИ В УНИВЕРСАЛЬНЫХ ДУГОВЫХ ПЕЧАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

1. Введение

Настоящее время показало, что создание эффективно действующей промышленности невозможно без внедрения инновационных проектов, по своим основным параметрам соответствующим или превышающим мировой уровень. К ним следует отнести: технико-экономические, энергоресурсосбережение, экологическое воздействие на окружающую среду, создание комфортных условий на рабочих местах. Особое значение имеет гарантия качества выпускаемой продукции. Все перечисленное в полной мере относится к производству стали. Оно массовое и качество его продукции определяет безопасность эксплуатации, изготовленного из стали оборудования.

В нашем представлении «сталь» - это сплав с заданным химическим составом, свойства которого определяются технологией производства, описанной в классической теории металлургических процессов сталеварения. В этом сочетании разработано большинство применяемых в машиностроении марок стали. Только строгое выполнение технологических требований и инструкций при производстве стали, опирающихся на результаты научных исследований, подтвержденных многолетним опытом промышленного ее производства, ведущих ученых металлургов мира реально обеспечивают заявленные показатели марок стали – механическую прочность, ударную вязкость, усталостную прочность, хладостойкость, стабильную структуру и др. Основы теории металлургических процессов изложены в множестве научных трудов и учебниках[1]. Создание плавильного оборудования, возможности которого максимально обеспечивают выполнение требований теории сталеварения явилось целью нашей работы.

Качество стали определяют процессы, происходящие на разделе шлак-расплав, которые имеют диффузионный характер, технология позволяет вести очистку металла от нерастворенных газов и неметаллических включений, проводить десульфурацию, дефосфорацию, науглероживание, обезуглероживание расплава, его легирование, рафинирование и структурирование. При производстве стали широко применяется рудный и кислородный кип. Отработаны процессы раскисления стали. В этой статье разъясняется связь технологических задач с режимами, конструкцией, научно-технической базой проектирования дуговых печей постоянного тока нового поколения (ДППТУ-НП) При производстве стали особое значение имеет гарантия качества выпускаемой продукции. Здесь не ставится цель перечислять достоинства новых печей – они подтверждены опытом промышленной эксплуатации, официальными документами, отзывами ведущих специалистов России, широко опубликованы. Многие освоенные в ДППТУ-НП процессы, например, выплавку высококачественных алюминиевых сплавов и некоторых специальных высоколегированных сталей и сплавов, провести переплав без потерь легирующих элементов стружки, в т.ч. высоколегированной стали, и т. д. в любых других дуговых плавильных печах мира осуществить невозможно.

2. Постановка задачи

При производстве стали с использованием металлического лома нами была поставлена задача **максимально сохранить металлическую часть шихты**, включая легирующие элементы, входящие в ее состав. Это возможно, если исключить из технологии выплавки стали в ДППТУ-НП ведение процесса окисления углерода (рудный или кислородный кип), совмещенного с расплавлением шихты и применяемого в настоящее время в массовых процессах производства стали. Для сохранения легирующих элементов окисление углерода целесообразнее вести при температурах, превышающих температуры начала восстановления оксидов легирующих элементов, приведенных в таблице 1.

Перед началом рудного или кислородного кипа необходимо обеспечить гомогенность температуры расплава.

Табл.1

Оксид	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	SiO ₂
Т, К	973	1503	1693	1813

Из табл.1 следует, что рудный или кислородный кип целесообразно вести при высоких температурах металла, при которых идет процесс окисления углерода, осуществляется управление его составом, проводится глубокая дегазация расплава и удаление неметаллических включений из него без окисления легирующих элементов. Совместить эти условия с расплавлением шихты невозможно.

На угар шихты в значительной мере влияет поступление кислорода в печную среду из воздуха. Газообмен прямо связан с уровнем стабилизации электрического режима дуги. Колебания тока дуги вызывают повышение содержания азота и кислорода в атмосфере печи, поступающих из воздуха. В соответствии с уравнением $PV=nRT$, при постоянном объеме печи (V), давление в печи (P) является функцией температуры (T) газа внутри печи. При колебаниях электрического режима происходит изменение температуры газов печной среды, и печные газы выбрасываются из печного пространства или засасываются в него. Этот режим характерен для ДСП и дуговых печей постоянного тока зарубежного производства, и устранен в ДППТУ-НП специальными, описанными ниже, режимами плавки. Подавление газообмена позволило не осуществлять принудительной эвакуации газов из печи, резко снизить окисление металла кислородом, поступающим в печь из воздуха, предотвратить насыщение металла азотом и кислородом. Обеспечивается плавка в атмосфере CO , выделяемого при прохождении реакции взаимодействия окисленной части шихты с углеродом.

Из сказанного следует, что требованием к процессам расплавления шихты относится высокий уровень стабилизации электрических режимов дугового разряда.

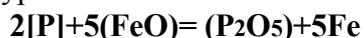
Расплавление шихты в условиях высокого содержания CO в печной атмосфере, с температурой, превышающей $1200\text{ }^{\circ}C$, позволяет провести восстановление окисленной части шихты, которая в современных процессах целиком переходит в безвозвратные потери.

Потерям шихты способствует испарение материалов в зоне электродных пятен дуговых разрядов, перегрев и кипение расплава под ними. Устранение негативного воздействия дуги на расплав является следующей важнейшей задачей организации плавки.

Предотвратить потери шихты позволяет покрытие по мере накопления расплава металла расплавом шлака.

Процесс расплавления является важнейшей стадией плавки, обеспечивающей конечное качество стали. Меры предотвращения угара шихты связаны с мерами, обеспечивающими качество выплавляемого металла. Устранение угара предотвращает образование в больших количествах первичного шлака, позволяет управлять свойствами шлака сразу после начала плавки и до ее завершения.

Высокоосновный шлак, температура которого в процессе расплавления поддерживается на невысоком уровне, с высоким содержанием CaO и окислов в нем металла из шихты, позволяет вести процесс дефосфорации в соответствии с уравнением:



При высоком содержании CaO в шлаке формируются устойчивые соединения $(CaO)_4 \cdot P_2O_5$ или $(CaO)_3 \cdot P_2O_5$ [1].

Отказ от окислительных реакций в процессе расплавления за счет продувки металла кислородом или другими газами обязывает обеспечить перемешивание расплава другими методами, не связанными с термохимическими воздействиями на металл. Это позволяет осуществить метод управляемого магнитогидродинамического перемешивания (МГД). МГД перемешивание должно выравнивать температуру расплава во всем объеме жидкой ванны, обеспечивать эффективную теплопередачу из дуги в расплав, предотвращать локальный перегрев расплава под опорными пятнами дуги, обеспечить развитую эффективную поверхность взаимодействия расплавов металла и шлака. Выполнение перечисленных условий позволяет уже в процессе расплавления вести удаление растворенных газов и неметаллических включений из расплава, диспергирование остающихся неметаллических включений, предотвращать взаимодействие расплава металла с печной атмосферой уже в начале плавки. Структура стали всегда будет иметь мелкое зерно, и она будет чистой по неметаллическим и газовым включениям, если ведется процесс переплава, подобный процессу плавки в индукционных печах (ИП). Но в отличие от плавки в ИП высокое качество получаемого металла будет обеспечиваться и при переплаве низкокачественной шихты, поскольку в дальнейшем

в процессе работы с расплавом возможно провести глубокую десульфурацию металла, дальнейшее удаление неметаллических и газовых включений за счет кипа и за счет шлаковых процедур, подробно описанных в классической теории металлургических процессов [1].

Предотвратить насыщение металла водородом, азотом в процессе дуговой плавки наиболее эффективно можно осуществив вытеснением этих газов из печной атмосферы предотвращением ее взаимодействия с окружающим воздухом, что перекликается с необходимыми условиями снижения угара шихты.

С качеством металла, с сохранением и управлением его наследственной структурой, связано требование устранения локальных перегревов расплава во все периоды плавки. Это требование является определяющим при плавке алюминиевых сплавов и также важно при плавке стали, и плавильный агрегат, безусловно, это требование должен обеспечивать.

С процессами, обеспечивающими снижение угара металла, его высокое качество, тесно связаны процессы подавления вредного воздействия на окружающую среду. Отказ от использования химических топлив для нагрева металла, продувки металла кислородом с целью ускорения плавления и снижения расхода электроэнергии соответствует требованиям Киотского протокола. Меры по снижению угара металла позволяют резко снизить пылевые выбросы плавки. Важным фактором негативного воздействия на окружающую среду особенно при дуговом нагреве является наличие в шихте органических и других загрязнителей, образование при плавке набора вредных газообразных соединений – диоксинов, фуранов, окислов азота, цианидов, монооксида углерода и др. Для организации экологически чистого производства лучшим видом энергии является электрическая. Ее производство ведется или на экологически чистых гидроэлектростанциях, атомных станциях, но основное производство сосредоточено на тепловых, связанных со сжиганием газа или угля. В отличие от плавильных печей, в которых газообразование формируется из набора случайных загрязнений, при сжигании газа и угля на тепловых электрических станциях понятно что сгорает и как проводить очистку образующихся газов. Существует широкая возможность выбора размещения электрических станций вдали от населенных пунктов. Для литейных металлургических предприятий такая возможность отсутствует, и весьма существенно – это снизить сложность и стоимость систем пылегазоочистки.

При организации процесса плавки удаление органических и других примесей осуществляется в ее начале и в момент завалки печи. По этой причине из технологии плавки необходимо исключить работу печей с «болотом» - остатком металла от предыдущей плавки. При завалке шихты на «болото» реализуется залповый выброс дыма при низкой температуре газов. Для подавления образования вредных химических соединений необходимо обеспечить выполнение следующих условий:

- с начала плавки подавить газообмен печной среды с окружающим пространством, в частности, поступление в печь кислорода, азота, водорода из воздуха. С этой целью, в том числе, нельзя откачивать печные газы из печного пространства принудительно;

- обеспечить температуру печных газов внутри печи, превышающую 1200 °С, при которой невозможно образование диоксинов, фуранов, цианидов и других экологически вредных газов, формируется восстановительная среда с высоким содержанием СО;

- обеспечить свободный выход печных газов в окружающую среду с высокой температурой, при которой при их смешивании с кислородом воздуха происходит их немедленное воспламенение и полное догорание;

- система вентиляции должна иметь производительность, позволяющую немедленно разбавлять отходящие из печного пространства газы, с высокой скоростью доводя их температуру до уровня ниже 100 °С;

- проводить технологические операции, рудный или кислородный кип, после расплавления металла и нагрева расплава до температуры, превышающей температуру начала восстановления оксидов легирующих элементов, введенных в расплав. При этом перед началом кипа необходимо обеспечить однородность температуры расплава.

Выполнение вышеперечисленных условий позволяет резко сократить расходы на производство стали за счет снижения угара шихты, сохранения легирующих элементов, входящих в состав шихтовых материалов, которые при современных технологиях теряются почти полностью;

снижения требований к качеству шихтовых материалов; снижения брака при производстве стали; значительного уменьшения энергоемкости производства и его воздействия на окружающую среду.

В процессе создания универсальных дуговых печей постоянного тока нового поколения – ДППТУ-НП был проведен анализ возможностей существующих плавильных печей постоянного тока, дуговых печей переменного тока (ДСП) и других, из которого было ясно, что без разработки и введения инновационных решений выполнить все перечисленные выше условия невозможно. Разработка ДППТУ-НП потребовала многочисленных исследований в области физики дуговых разрядов, электромагнитной гидродинамики, теплотехники, взаимодействия дуговых разрядов с нагреваемыми материалами и других научных исследований, проведенных во взаимодействии с ведущими специалистами страны. Исследования показали, что в дуговых печах переменного тока при воздействии на металл дуговых разрядов теплопередача через расплав осуществляется в основном теплопроводностью, с реализацией значительного перепада температур в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это приводит к значительному перегреву поверхности расплава, особенно под дугами, вялой передаче энергии дугового разряда в расплав. Расплавление характеризуется высоким уровнем нестабильности электрических разрядов. Необходимое перемешивание расплава можно обеспечить только с помощью продувки расплава газами, но при этом эффективность теплопередачи от электрических дуг в расплав практически не увеличивается. По этим причинам реализуются главные недостатки ДСП: низкая производительность, высокий (4,5-6,5%) угар металла, интенсивные пылегазовыбросы, шум, неблагоприятное воздействие на питающую энергосистему. Современные методы ускорения плавки в ДСП за счет продувки металла кислородом, использования топливных горелок для нагрева шихты, вспененных шлаков, т.е. практическая комбинация методов нагрева применяемых в конвертерах, мартеновских печах, дуговых печах нами при создании ДППТУ-НП не рассматривались, в связи с их очевидными недостатками: еще более увеличенным угаром металла, многократным негативным возрастающим воздействием на окружающую среду, практического отказа от использования классических технологий сталеварения в плавильных печах, гарантирующих качество стали, их замена на производство вспененного продукта в установках печь-ковш.

Перевод ДСП на питание постоянным током решает проблемы плавки только частично, снижая генерируемый печами шум, расход графитированных электродов, несколько уменьшает воздействие на питающую энергосистему. Особенно низкая эффективность применения постоянного тока в дуговых печах реализуется при применении простейшей схемы – это подключение 2-ух графитированных электродов: одного – к положительному, другого – к отрицательному выводам источников электропитания. Во всех исследованных дуговых печах постоянного тока отсутствует перемешивание расплава, значимо влияющее на ход технологии плавки. То есть простой перевод ДСП на питание постоянным током существенных преимуществ не создает.

3. Научно-техническая база создания ДППТУ-НП.

Проведенные нами исследования показали, что эффективно использование системы технических решений, в которой применение различного вида дуговых разрядов постоянного тока с реализацией их возможностей являются составной частью системы.

В ДППТУ-НП разработки НТФ «ЭКТА» применяются два вида дуговых разрядов – колонный и спиралевидный.

В первом (колонном) катодное пятно дуги фиксируется на поверхности катода (графитированного электрода). Столб дуги на начальном участке в направлении от катода к аноду (шихте) имеет форму конуса затем переходящую в цилиндрическую. Анализ результатов исследований характеристик дуги [2] показал эффективность его использования для реализации перечисленных выше технологических задач первого периода плавки. Вблизи катода столб дуги имеет коническую форму и действует в этой области как электромагнитный насос, закачивая в себя газ из окружающей атмосферы, и в результате действия электромагнитных сил направляя его к аноду. Это позволяет с высокой скоростью провести нагрев и затем удерживать температуру печных газов выше 1200 °С, выполняя изложенные выше требования по температуре печных газов связанные с экологией.

Известно[2], что свободно горящие дуги, к ним относится колонная дуга, геометрически не стабильны. Поэтому дуга горит между торцевой поверхностью графитированного электрода и ближайшим к нему куском шихты. Расплавив его, дуга привязывается к следующему ближайшему и т.д., проплавляя в шихте не глубокие узкие колодцы, которые проплавляются во всех известных дуговых печах, а широкую, расширяющуюся вверх воронку. Это полностью устраняет колебания электрической мощности, связанные с обрушением шихты и поломки электродов. Стекающие капли металла невозможно перегреть, что обеспечивает изложенные выше требования – не допускать локальный перегрев расплава и его испарение под пятном дуги. Выбор высокого уровня напряжения источника электропитания позволяет до проплавления воронки в шихте удерживать электрод над шихтой, длительное время не допускать привязку анодного пятна дуги к расплаву на подине печи, поддерживать длину дуги, при которой ее изменения при переброске с одного куска шихты на другой практически не вызывают колебаний напряжения (мощности) дуги и при принудительной стабилизации тока дуги обеспечить подавление (см. выше) поступления воздуха в печное пространство. Печная атмосфера в ДППТУ-НП формируется за счет продуктов плавки. Высокое напряжение на дуге в начальный период плавки обеспечивается сначала за счет поступления в нее холодного газа из печной атмосферы, затем продуктов испарения влаги, органики, других материалов, загрязняющих шихту. Они имеют высокий потенциал ионизации и повышают градиент напряжения дуги. По мере разогрева печных газов и удаления из них примесей градиент напряжения дуги снижается, а высокий уровень напряжения сохраняется при удлинении дуги за счет углубления воронки в шихте и работы механизма перемещения электрода. Существование колонного разряда возможно при низкой плотности тока в графитированном электроде. Поэтому расплавление шихты ведется на высоком напряжении и ограниченном токе дугового разряда. Основная мощность дуги передается в металл излучением и конвекцией, и только 5-7 % энергии выделяется в анодном пятне. Это позволяет, в отличие от ДСП, не форсировать проплавление глубокого колодца в шихте после образования которого основная мощность дуги выделяется вблизи подины печи где металл перегревается, и нагрев верхней части шихты резко замедляется, а вести разогрев всей шихты. При проплавлении воронки вместо колодца капли металла стекают на подину, где идет накопление расплава без его перегрева. В результате в ДППТУ-НП нет смысла работать с «болотом» и применять различные виды горелок для нагрева шихты.

Мы рекомендуем вместе с шихтой загружать в печь шлакообразующие материалы. При подавленном угаре шихты практически отсутствует первичный шлак, и есть возможность синтезировать шлак любого состава сразу после начала плавки. Шлакообразующие материалы расплавляются вместе с металлом и уже с начала плавки защищают расплав и очищают его от неметаллических включений и фосфора.

Использование режима «колонная дуга» целесообразно в начале плавки. Он позволяет самым эффективным способом из известных очистить шихту от примесей, нагреть ее до температуры близкой к температуре плавления и только частично ее расплавить, проплавить в шихте воронку, вершина которой опирается на расплав на подине.

Последующие периоды плавки следует вести дугой спиралевидной формы «ДСФ» Она является другой устойчивой формой дугового разряда. При повышении плотности тока в графитированном электроде столб дуги сворачивается в спираль, спираль охватывает продольное электромагнитное поле, генерируемое током протекающим по дуговому каналу, и дуговой канал с высокой скоростью вращается, увлекая за собой опорные пятна дуги – катодное пятно перемещается по торцевой поверхности графитированного электрода, анодное – по поверхности металла. Эти процессы нами исследовались с применением сверхскоростной киносъемки. В переходной области при повышении тока дуги переход колонного разряда в спиралевидный проходит скачкообразно и сопровождается 30%-ным скачкообразным ростом напряжения и изменением внешней формы плазменного канала. ДСФ имеет форму слегка расширяющегося от катода к аноду цилиндра. Диаметр верхнего основания цилиндра практически совпадает с диаметром торцевой поверхности графитированного электрода, т.е. по сравнению с колонной дугой многократно возрастает эффективная поверхность взаимодействия дугового разряда с графитированным электродом и металлом, а также диаметр токоведущего плазменного канала (в ДСФ диаметры плазменного канала и дугового столба не совпадают). В ДСФ практически отсутствует газообмен печной среды с

дуговым разрядом, т.е. интенсивный нагрев печных газов дугой прекращается. За счет собственного магнитного поля ДСФ жестко стабилизирован в пространстве и не меняет направления даже при значительном межэлектродном промежутке и наличии вблизи столба кусков шихты. Если плавку начать в режиме ДСФ, то в шихте будет проплавлен глубокий узкий колодец. В теплообмене ДСФ с окружающей средой при значительном межэлектродном промежутке основную роль играет теплопередача излучением, при его сокращении увеличивается энергия, передаваемая из дуги непосредственно в расплав. Сокращением длины межэлектродного промежутка долю энергии дуги, передаваемой непосредственно в расплав, можно изменять в пределах от 20% до 80-90%, при этом необходимо решить задачу поглощения энергии высокой концентрации дуги расплавом и устранения перегрева металла под дугой. Это можно выполнить путем организации направленного интенсивного потока металла из под дуги вглубь расплава. Никакие известные методы перемешивания расплава – электромагнитодинамические, газодинамические, рудный или кислородный кип эти условия не выполняют. Поэтому, во всех известных дуговых печах постоянного и переменного тока можно быстро провести плавление шихты пока стены печи закрыты ею и можно плавить длинными дугами с высоким, за счет этого, напряжением на них и максимальном токе. Затем повышенная облученность стен и свода печи заставляет или уменьшать длину дуги и подводимую мощность, или закрывать дуги вспененным шлаком и применять термохимические процессы. В первом случае снижается производительность, во втором – значительно увеличиваются угар шихты и пылегазовыбросы процесса плавки, а экономия электроэнергии в печи компенсируется ее высоким расходом в системах газоочистки, теряется технологическая универсальность оборудования.

Разработка эффективного способа перемешивания расплава решающего поставленные задачи была выполнена на основе исследований магнитогидродинамических (МГД) процессов, протекающих в ванне дуговых печей постоянного тока, проведенных совместно со специалистами Института Физики Латвийской ССР АН СССР. В работе были широко использованы методы математического и физического моделирования, а также натурные испытания. В результате были созданы и запатентованы способ и устройство МГД перемешивания расплава в дуговых печах постоянного тока решающие поставленные задачи [3,4].

Для перемешивания расплава в подине печи устанавливаются несколько подовых электродов, подключенных к источнику электропитания, позволяющему вести независимое управление током в каждом из них.

Перемешивание металла организовано следующим образом. При установленных в подине печи двух и более подовых электродах, смещенных относительно центра печи, вектор тока внутри расплава имеет горизонтальную и вертикальную составляющие. Взаимодействие вертикальной и радиальной составляющих тока с магнитным полем тока составляющих формирует поток расплава, при котором холодный металл с большой скоростью набегает под пятно дуги, поглощает ее энергию (рис. 1а) и уходит вглубь расплава. По подобному типу формируется и горизонтальное перемешивание расплава (рис.1б). Это перемешивание идеально для передачи энергии дуги в расплав и для футеровки печи, поскольку вблизи футеровки печи скорость перемешивания металла минимальна. Однако с течением короткого времени характер перемешивания металла меняется, в расплаве появляются вихревые потоки, а движение основной массы металла прекращается (Рис.1в). Для предотвращения этого явления и управления скоростью и формой перемешивания металла регулятором тока тиристорного преобразователя время от времени проводится кратковременное снижение тока в одном или нескольких подовых электродах, при котором вихревые потоки разрушаются, и тем восстанавливают регулярное перемешивание расплава. Изменением периодов и глубины токовых пауз управляют интенсивностью перемешивания.

Рис. 1 Схема перемешивания расплава в ДППТУ-НП.



1а) – схема управляемого перемешивания. 1б)- управляемое перемешивание расплава в горизонтальной плоскости. 1в) – движение расплава в печи постоянного тока без системы управляемого перемешивания.

Перемешивание расплава обеспечивает идеальную гомогенность температуры и химического состава металла и шлака, развитую поверхность взаимодействия между ними. За счет интенсификации теплообмена между дугой и расплавом, конвективного теплопереноса в расплаве, усиленного теплообмена расплава с шихтой при движении расплава вдоль границы их взаимодействия, значительно ускоряются процессы расплавления металла и шлака, ассимиляции легирующих элементов. Это определяет эффективность плавки и расход энергии на ее ведение, а не количество электрических дуг, горящих в печи. При прочих равных условиях удельный расход электроэнергии в ДППТУ-НП всегда ниже расхода в ДСП.

Ограниченная теплопередача из дуги в расплав позволила создать высокопроизводительные ДСП только с применением вспененного шлака, закрывающего дугу, и кислородной продувки металла, обеспечивающей его перемешивание. Необходимость использования перечисленных приемов, ограничивших технологические возможности оборудования, определили замену процессов сталеварения, проводившихся в печах, на процессы синтезирования стали в установках печь-ковш. Система МГД перемешивания снимает ограничения теплопередачи и позволяет создавать высокопроизводительные печи использующие только дуговой нагрев. Это не исключает использование в них \square спененных шлаков, кислородных продувок и т.д., в технологических процессах.

Благоприятное воздействие развитого теплопереноса в расплавах металла и шлака и между ними на качество металла широко известно из классической теории металлургических процессов.

Важными элементами ДППТУ-НП являются подовые электроды. Их размещают внутри футеровки подины печи, и они обеспечивают подвод тока от источника питания к металлу. Исходя из условий организации перемешивания расплава в печи нельзя применять токопроводящие подины и различные конструкции распределенных токоподводов. В процессе длительной промышленной эксплуатации применялись различные типы подовых электродов, но наилучшим из них явилась конструкция подового электрода, описанная в патенте РФ [5]. В конструкции подового электрода решены вопросы организации его производства, ремонта, надежности в эксплуатации, взрывобезопасности. Подовый электрод представляет собой стальные листы, проходящие через подину печи. Стальные листы приварены к базе подового электрода, состоящей из стальной трубы, внутренняя часть которой методом ЭШП заполнена медью. База размещена в нижней части футеровки вдали от ее рабочей поверхности. Под корпусом печи выполнены каналы охлаждения. Внутри базы размещены датчики контроля температуры.

Конструкция взрывобезопасна, поскольку каналы охлаждения вынесены за пределы печи, и состояние подового электрода непрерывно контролируется датчиками температуры, размещенными в нем. При замене футеровки стальная часть подового электрода обрезается, и к ней приваривается новая. Сварка между стальными листами и базой легко осуществима, т.к. и то, и другое выполнено из однородного материала. Надежный контакт меди и стали обеспечен технологией электрошлакового литья или другими методами. Для гарантированно длительной работы подового электрода и его контакта с шихтой, организации полного слива расплава, нами разработаны и

запатентованы ряд приемов. Они позволяют успешно вести плавку металлической и слабоэлектропроводной шихты: шлаковых съёмов, окислов для проведения их карботермического или металлотермического восстановления и др. Технология ввода подовых электродов в эксплуатацию обеспечивает формирование в верхней части футеровки жаростойкого конгломерата, состоящего из металла и материалов футеровки, с развитой контактной поверхностью взаимодействия с шихтой. Система МГД перемешивания расплава защищает контактную поверхность подины от размывания вихревыми потоками в расплаве. В ДППТУ-НП, как и в ДСП, при размывании и срыве подины можно проводить горячие (наварку подины) и холодные ремонты.

В дуговых печах плавление металла ведут электрическими дугами, горящими между графитированными электродами и шихтой. Графитированный электрод является классическим термокатодом и подвергается минимальной эрозии, если используется в качестве такового. При работе в качестве анода графитированный электрод подвергается многократно усиленной эрозии. При работе на переменном токе из-за регулярной смены полярности тока удельные потери массы графитированного электрода в лучшем случае лежат в пределах 4,5-6,5 кг на тонну стали, и плавка сопровождается науглероживанием металла. В ДППТУ-НП средние удельные потери электрода – 1,5 кг на тонну стали, и науглероживание металла отсутствует. Это послужило одной из причин не рассматривать простейшую возможность использовать в печах двух графитированных электродов, один из которых, вместо подовых, - анод. В ДППТУ-НП, как и в ДСП, обычно используют секционированные графитированные электроды, состоящие из секций, с торцевых сторон которых выполнены резьбовые проемы. Между собой секции соединяются графитовыми ниппелями с резьбой. Максимальная допустимая плотность тока в электроде – 30 А/см². Ее ограничивает нагрев части электрода, расположенной над сводом печи, протекающим в ней током. При нагреве свыше 400°С в электроде начинается межкристаллитное окисление, и он теряет механическую прочность. В ДППТУ-НП организацией плавки устранена опасность электрических замыканий боковой поверхности электрода на шихту с образованием паразитных дуг. Это позволяет создавать комбинированные электроды, закрепляя графитированные электроды на водоохлаждаемых электрододержателях, при этом токоведущий участок, расположенный над сводом, - это водоохлаждаемая труба. В комбинированном электроде потери графита снижены до 0,6 кг/т стали и допускают увеличение плотности тока до 60 А/см². Это позволяет не создавать специальных электродов больших диаметров для высокоомощных печей. Конструкция ДППТУ-НП обеспечивает простую замену одного типа электрода на другой.

Технологические возможности ДППТУ-НП значительно расширяет применение плазменных катодов. Это комбинированные электроды, вдоль осей которых выполняются сквозные отверстия, соединенные с системой подачи плазмообразующих газов – Ar, N₂, O₂ и др. и их смесей. Их применение позволяет управлять составом печной атмосферы и вести активные технологические процессы, восстановив и расширив возможности ранее созданных плазменных печей [2]. Например, при замене печной атмосферы на аргон, то есть при создании химического вакуума, появляется возможность выплавки практически всего сортамента вакуумных индукционных печей, причем возможность ведения активных шлаковых процессов снижает требования к качеству шихты. При организованном МГД перемешивании расплава с заданной температурой и высокой скоростью массообмена, подача кислорода в качестве плазмообразующего газа позволяет вести глубокое обезуглероживание легированной стали без угара легирующих элементов. Подача азота – вести производство азотированных сталей и т.д. Сочетание подачи плазмообразующих газов с МГД перемешиванием металла в ДППТУ-НП позволяет на новом уровне воссоздать разрушенный или неудачно, без согласования с авторами проектов, реконструированный парк плазменных печей и уникальные, разработанные специалистами ведущих институтов СССР, плазменные технологии.

4. Техническая реализация системных решений ДППТУ-НП.

Выбор дугового нагрева постоянного тока при создании универсальных плавильных печей был определен, исходя из явных его преимуществ и возможностей. К ним относится, прежде всего, доступность применения технических решений разработчиков ДСП: механических частей печей, конструкций их футеровок, футеровочных материалов, водоохлаждаемых элементов, графитированных электродов, технологий и оборудования для их реализации и др. В этом

отношении ДППТУ-НП мало отличаются от ДСП. В отличие от ДСП на ДППТУ-НП устанавливают один графитированный электрод (вместо трех) и в подине печи размещают несколько подовых электродов. Это позволяет, при необходимости использовать механические части действующих ДСП при их реконструкции в ДППТУ-НП.

К настоящему времени создана база производства надежных источников электропитания постоянного тока любой необходимой мощности с развитой структурой управления режимами работы. Их преимуществом является то, что они позволяют проводить широкий набор коммутаций электросиловых схем. Эта возможность была использована в источниках питания ДППТУ-НП разработанных и запатентованных [3, 4] специалистами НТФ «ЭКТА», которые включают в себя трансформатор с несколькими трехфазными обмотками, каждая из которых подключена к секции тиристорного преобразователя. Для примера рассмотрим источник электропитания с четырьмя секциями тиристорного преобразователя с независимой системой управления током каждой. Источник питания (ИП) ДППТУ-НП оснащен переключателями секций тиристорного преобразователя. Тиристорными переключателями секции можно коммутировать последовательно, последовательно – параллельно и параллельно. Напряжение и ток каждой из секций одинаковы, и определяются условием ведения третьего режима плавки (при параллельном включении секций).

При последовательном соединении секций напряжение на них суммируется, и номинальный ток ИП соответствует току поддержания колонной дуги, выбранной для ведения первого периода плавки. Графитированный электрод сразу после зажигания дуги оставляют неподвижным, и после достижения номинального напряжения дугового разряда при углублении воронки в шихте напряжение стабилизируют перемещением электрода.

После окончания проплавления воронки в шихте проводят переключение секций, по две из них соединяя последовательно. Отрицательные выводы последовательно включенных секций соединяют с графитированным электродом, положительные – каждая со своим, одним из двух, подовым электродом. Подовые электроды установлены в подине в позициях, обеспечивающих одно из условий МГД перемешивания расплава. Переключение секций приводит к удвоению тока дуги и соответствующему снижению напряжения источника электропитания. В ДППТУ-НП выбор сечения графитированного электрода гарантирует после переключения секций переход режима колонной дуги в режим ДСФ, а длина дуги сокращается за счет снижения напряжения ИП и повышения градиента напряжения на межэлектродном промежутке. Второй режим плавки ведут, включив в системе управления ИП алгоритм управления МГД перемешивания расплава, и поддерживают длину дуги и напряжение на ней, при которых примерная теплопередача из дуги – 80% - излучением на шихту и 20% - теплопередача из прианодной области дуги непосредственно в расплав. Дуга размещается внутри воронки в шихте и с высокой скоростью ведет плавление металла. При расплавлении шихты стекающий с нее расплав перегреть невозможно. МГД перемешивание устраняет перегрев металла под дугой и обеспечивает передачу энергии дуги в расплав. Расплав при движении разносит энергию по ванне и на границе с шихтой передает ей энергию. Эффективность теплопередачи на границе расплав-шихта определяется скоростью движения металла. Все это поддерживает температуру расплава, слегка превышающую температуру плавления шихты.

После расплавления основной массы шихты и возрастания прямого излучения дуги на футеровку реализуют третий режим плавки. В третьем периоде переключением всех секций параллельно ток увеличивают еще в два раза – по сравнению со вторым периодом и в четыре раза – по сравнению с первым периодом плавки, а напряжение источника питания пропорционально увеличению тока снижается, т.е. вся плавка ведется при постоянной мощности с полным использованием силовых возможностей трансформатора. Положительные выводы секций источника питания подключают к подовым электродам попарно.

Увеличение тока приводит к увеличению интенсивности перемешивания расплава, а энергия дуги перераспределяется. В отличие от первого и второго периодов, в которых основная доля энергии излучалась на шихту, доля энергии третьего периода (до 80-90%) передается непосредственно в расплав, а система перемешивания переносит ее вглубь расплава. До полного расплавления шихты температура расплава не повышается, затем она быстро возрастает.

По окончании расплавления отбирается проба на химический анализ и определяется стратегия доводки стали (других сплавов) в соответствии с базовыми законами классической теории металлургических процессов.

Процесс доводки стали, ускоренный управляемым МГД перемешиванием, осуществляется или короткими включениями в режиме третьего периода, или с отключением одной или двух секций тиристорного преобразователя, а также изменением тока системы управления тиристорного преобразователя.

На ДППТУ-НП установлена современная система микропроцессорного управления ИП, обеспечивающая ведение плавки в автоматическом режиме, контроль и защиту элементов печной установки.

На базе ДППТУ-НП разработаны дуговые универсальные миксеры (реакторы) постоянного тока (ДМПТУ). Они работают, в основном, с жидкой завалкой и позволяют вести накопление, выдержку, нагрев и раздачу расплава, включая сталь, а также технологическую обработку расплава шлаками, его легирование и рафинирование. Источник электропитания (ИП) ДМПТУ оснащен только параллельно включенными секциями преобразователя. Мощность ИП ДМПТУ в четыре-пять раз ниже мощности ИП ДППТУ-НП той же вместимости. При одинаковой электрической мощности источников питания ДМПТУ и ДППТУ-НП вместимость ДМПТУ может превышать вместимость ДППТУ-НП соответственно в 4-5 раз. Установка ДМПТУ позволяет значительно расширить технологические возможности литейного и металлургического производств, например, сочетание ДППТУ и ДМПТУ позволяет при ограниченной подключенной электрической мощности вести производство отливок в широком диапазоне масс. При производстве стали из чугуна продувку чугуна кислородом с целью его обезуглероживания целесообразно заменить обезуглероживанием методом рудного кипа, ускоренного МГД перемешиванием расплава. Это позволяет вместо угара чугуна получить пригар и за счет этого увеличить выпуск стали на 15-20%.

5. Заключение.

В настоящее время можно достоверно оценить результаты широкого промышленного освоения двух основных способов производства стали - сталеварения, базирующегося на основах теории металлургических процессов, разработанных ведущими учеными металлургами мира, и метод синтезирования стали, осуществляемый в установках печь-ковш путем доводки до заданных химсостава и свойств полупродукта, производимого из стального лома и чугуна в конвертерах и комбинированных (с использованием химико-термических методов нагрева) ДСП.

Процесс сталеварения проводится и завершается в плавильной печи – мартене, конвертере или ДСП, и свойства стали могут быть улучшены методами внепечной обработки. На основе процессов сталеварения разработаны практически все марки стали, состав и свойства которых гарантированы научно обоснованными широко известными технологиями их производства. Методами сталеварения экономично достигаются важнейшие показатели качества: механическая, усталостная прочность, хладостойкость, качество и стабильность структуры и др.

При производстве тех же марок стали методом синтезирования выясняется, что отказ от классических технологий заставляет для перемешивания металла в печи-ковше использовать аргон, для десульфурации – магниевые лигатуры, для связывания азота – ферротитан, для улучшения микроструктуры – феррониобий и феррованадий; предлагаются всевозможные модификаторы, шлакообразующие порошки и т.д. При этом, многие проблемы, связанные с качеством стали, в частности, хладостойкостью, усталостной прочностью, неметаллическими включениями и др., остаются. Добиться высокой производительности комбинированных ДСП удалось путем отказа от классических технологий, значительного увеличения угара шихты и пылегазовыбросов по сравнению с классическими ДСП.

Результаты сравнения методов производства стали, при объективной их оценке показывают, что нет причин отказываться от классического сталеварения, необходимо продолжать развивать его научную базу, создавать современное наукоемкое оборудование для наиболее эффективной реализации технологических процессов. В этом мы видим актуальность создания оборудования и технологий ДППТУ-НП и ДМПТУ, позволяющих на новом уровне решать перечисленные в статье задачи.

Подробную информацию можно получить на сайте www.stf-ecta.ru

Список литературы:

1. Б.В. Линчевский « Теория металлургических процессов», Москва, Металлургия 1995 г.
2. В.С. Малиновский « Исследование и разработка мощных плазмотронов постоянного тока для плазменных плавильных печей с керамической футеровкой». Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. ВНИИЭТО, Москва, 1980г.
3. Малиновский В.С., Чудновский А.Ю., Липовецкий М.М. Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления». Патент 2048662 РФ.
4. В.С. Малиновский "Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления". Патент РФ № 2104450.
5. В.С. Малиновский "Подовый электрод электропечи". Патент РФ № 2112187.