

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ПРИ ВЫПЛАВКЕ ЧУГУНА И СТАЛИ.

**Афонаскин А.В. (ОАО "Курганмашзавод" г. Курган),
Андреев И.Д. (ОАО "Курганмашзавод" г. Курган),
Евсеев В.С. (ОАО "Курганмашзавод" г. Курган)
Малиновский В.С. (ООО "НТФ "ЭКТА" г. Москва),
Малиновский В.Д. (ООО "НТФ "ЭКТА" г. Москва),
Ярных Л.В. (ООО "НТФ "ЭКТА" г. Москва)**

На Сталечугунолитейном заводе (СЧЛЗ) ОАО "Курганмашзавод" для плавки чугуна и стали используют дуговые печи переменного тока (ДСП) ДС-5МТ номинальной емкостью 5 т сплава. Технические возможности этих печей позволяют выплавлять широкую гамму литейных сплавов из черных металлов с высокими показателями качества независимо от качества поступающих шихтовых материалов. Это обстоятельство выгодно отличает СЧЛЗ от других предприятий, оснащенных, например, индукционными печами, пассивными в технологическом отношении.

Большая номенклатура литья, высокое его качество и невысокая стоимость отливок обеспечивают стабильный сбыт литья, ритмичную работу предприятия.

На заводе освоен выпуск около 5 тыс. наименований отливок из различных марок сталей: углеродистых, легированных и высоколегированных, а также чугунов серых от СЧ15 до СЧ30 и высокопрочных от ВЧ40 до ВЧ70.

Недостатком ДСП являются высокий угар шихтовых материалов – 5-6,5 %, большой расход графитированных электродов – 5,5 кг/т и более, пылегазовыбросы во время плавки значительно превышают предельно допустимые. Уровень шума, воздействующего на персонал, достигает 103-105 дБА.

Для повышения рентабельности производства многие фирмы предлагают реконструкцию ДСП, заключающуюся в увеличении мощности печного трансформатора, использовании кислорода, газокислородных горелок, вспененного шлака и др. Это обеспечивает снижение удельного расхода электроэнергии, графитированных электродов, ускоряет темп плавления. Однако, после реконструкции работа печей возможна только с "болотом" – остатком металла в печи в количестве 10-30 % от вместимости ванны, угар шихты увеличивается до 9-12 %, многократно увеличивают пылегазовыбросы и генерируемый печами шум, а затраты на энергоносители, в состав которых входят железо, легирующие элементы переплавляемой шихты и чугун, сгорающие в процессе плавки, электроэнергию, газ, кислород, угольный порошок, увеличиваются, а не уменьшают затраты на передел. При наличии "болота" затруднителен переход с одной марки металла на выплавку другой, а угар шихты, состоящей в литейном производстве на 40-60 % из возврата собственного производства, приведет к сверхвысоким потерям основного металла и ферросплавов, исключит экономичный переплав легированной шихты, приведет к оснащению печи дорогими системами пылегазоочистки [1]. Реконструкция ДСП по предлагаемой схеме потребует строительства газокислородной станции, создания коммуникаций подвода газа или мазута, создаст проблемы по утилизации резко возросшего количества шлака. В реконструируемой ДСП возможно проведение процессов расплавления шихты в режиме окислительной плавки с получением полупродукта, а основной процесс получения стали переносится в установку печь-ковш, т.е. обязательно формирование дуплекс-процесса. В печи-ковше предполагается ведение достаточно энергоемких процессов легирования расплава, его продувку газом в основном аргоном или азотом для перемешивания расплава, обработка металла порошковыми шлакообразующими реагентами с целью десульфурации и синтетическими шлаками, раскисление алюминиевой проволокой, подаваемой в расплав с высокой скоростью,

другие технологические процедуры. Нагрев расплава проводится электрическими дугами переменного тока. Данный метод широко распространен в мире для производства стали на металлургических предприятиях, и его основным достоинством считается высокая удельная производительность оборудования. Металл в дальнейшем подвергается, как правило, прокатке и соответствует по качеству предъявляемым требованиям.

В литейном производстве, как правило, обработка металла давлением отсутствует и поэтому брак отливок связанный с качеством жидкой стали не устраняется. В этом случае дуплекс-процесс может быть причиной снижения качества расплава, полученного, например, в мартеновских печах, характерной особенностью которых является "мягкий" без локальных перегревов процесс плавки металла, сопровождаемый глубокой дегазацией расплава в период рудного кипа. Локальный перегрев металл под дугами в печи-ковше практически до температуры кипения способствует повышенному растворению азота, нарушению однородности наследственной структуры стали, усилению насыщения металла неметаллическими включениями.

При выборе направления реконструкции может рассматриваться замена дуговых печей индукционными, но при этом, следует учитывать высокое качество металла получаемого в дуговых печах для литых заготовок. В индукционной печи любой конструкции невозможно провести активные шлаковые процессы, рудный или кислородный кип, а это значит, что для получения качественного металла в индукционной печи требуются высококачественные шихтовые материалы. Такая шихта, как правило, недоступна предприятиям, или имеет высокую стоимость, а также повышенный расход электроэнергии и повышенные требования к футеровке и др. побуждают сохранять электродуговой способ получения черных металлов.

Специалисты ОАО "Курганмашзавод" и ООО "НТФ "ЭКТА" приняли решение провести совместную работу по переводу дуговых печей переменного тока на питание постоянным током. При этом предполагалось, что новая технология плавки металла должна уменьшать уровень загрязнения окружающей среды и воздействие на питающую энергосистему до допустимых величин, а снижение угара металла, уменьшение расхода графитированных электродов и повышение качества металла должны быстро окупить произведенные затраты.

Простая замена дугового нагрева переменного тока на постоянный создает ограниченные преимущества, заключающиеся в снижении расхода графитированных электродов и снижении фликера питающей энергосистемы. В ряде случаев такая замена может привести к повышению газонасыщенности металла. Это наблюдается в дуговых печах постоянного тока ОАО "Мечел", которые были реконструированы из плазменных и дуговых печей постоянного тока, разработанных во ВНИИЭТО. Плазменные и дуговые печи, созданные при участии авторов обеспечили выплавку более 240 наименований специальных сталей и сплавов высокого качества, но в дальнейшем без согласования с авторами разработки были неудачно реконструированы и потеряли свои технологические и технико-экономические преимущества.

Высокий эффект от внедрения дуговых печей постоянного тока (ДППТ) достигается при комплексном подходе к организации плавки металла, при котором использование дуги постоянного тока является одним из элементов общего технического решения. В ДППТ разработанных и запатентованных специалистами ООО "НТФ "ЭКТА" организация процесса расплавления шихты, управляемого перемешивания расплава, взаимодействия дуги и расплава, управление электрическими параметрами печи [2] обеспечивает отсутствие заметного локального перегрева расплава во все периоды плавки, равномерность температуры и химсостава расплава, эффективное взаимодействие расплава и шлака, высокую скорость протекания металлургических реакций, низкий угар шихты и ферросплавов, быстрое формирование шлака высокого качества, подавление взаимодействия печной среды с окружающим пространством, обеспечивающие экологическую чистоту плавки при минимальном уровне пылегазовыбросов, сниженный

расход электроэнергии, возможность проведения в чистом виде всех металлургических процессов, разработанных для печей с кислой и основной футеровкой.

ДППТ предназначены для получения стали, чугуна, сплавов на основе алюминия, меди, кобальта, никеля высокого качества непосредственно в печи, которые можно дополнительно обработать в ковше, например, продувкой аргоном, но не следует в ковше подвергать расплав дуговому нагреву, поскольку высокое качество металла выплавленного в печи при этом будет снижено.

В результате проведенной совместно с ООО "НТФ "ЭКТА" работы две дуговые печи переменного тока ДС-5МТ были реконструированы в агрегат постоянного тока ДППТ-5АГ.

Результаты освоения ДППТ-5АГ подтвердили правильность выбора направления работы по переводу плавки металла с переменного тока на постоянный. Четырехлетний опыт работы на печи постоянного тока превзошел уровень запланированных технико-экономических показателей при выплавке стали и чугуна.

Подтвердилось главное технологическое преимущество печи постоянного тока перед плавильной печью переменного тока, которым является перемешивание расплава в процессе плавки и активное взаимодействие металла со шлаком, что определяет получение высокого качества металла.

Были проведены сравнительные плавки синтетического чугуна в печах переменного тока ДС-5МТ и в печи постоянного тока ДППТ-5АГ с основной футеровкой с целью определения темпов науглероживания расплава, а также темпов удаления серы и фосфора из металла. Во всех случаях плавилось по 5 т металла на одинаковой шихте. Расчетное количество углерода в металлической шихте составляло $\approx 2,2$ %. Пробы отбирались с интервалом в 10 мин. Науглероживатель – графитовая крошка электродного боя фракцией 3-10 мм загружалась на подину после выпуска предыдущей плавки.

При выплавке синтетического чугуна в печи постоянного тока графитовая крошка усвоилась металлам \approx на 75-80 %. С момента зажигания дуги на расплавление, нагрев и науглероживание чугуна потребовалось 80 мин.

№ пробы	Содержание углерода, %
1 проба	3,58
2 проба	3,61
3 проба	3,62

Такое содержание углерода в расплаве свидетельствует, что науглероживатель, практически, полностью усвоился к моменту взятия 1 пробы, т.е. через 50-55 мин после включения печи.

Удаление фосфора выглядело таким образом:

№ пробы	Содержание серы, %	Содержание фосфора, %
1 проба	0,0513	0,0893
2 проба	0,0402	0,0878
3 проба	0,0308	0,0844

Для сравнения была определена усваиваемость углерода из графитовой крошки в печи переменного тока – 50-55%, длительность плавки при этом составляет 2 ч 30 мин – 3 часа. В ней корректировка металла по углероду требует скачивания шлака. Такая низкая усваиваемость углерода из графитовой крошки объясняется свойственной для ДСП пониженной на 70-100 °С температурой металла у подины по отношению к температуре расплава у поверхности ванны. Для того чтобы началось эффективное растворение графита в расплаве требуется перегрев расплава и доведение температуры металла у

подины до 1500-1550 °С. Это приводит к дополнительному расходу электроэнергии на перегрев и значительному удлинению процесса плавки.

Окончательный химический состав синтетического чугуна, выплавленного в печи постоянного тока, был получен:

C-3,60%, Mn-0,96% Si-2,18%, S-0,027%, P-0,086%.

По содержанию углерода и кремния такой чугун соответствует марке СЧ15 по ГОСТ1412-85. Однако, механические свойства чугуна этой плавки дали следующий результат: $\sigma_b=21,0$ кгс/мм², HB-229, т.е. соответствует марке СЧ20.

В связи с большим повышением цен в январе-феврале 2004 г. на чушковые чугуны – литейные и передельные перед СЧЛЗ остро встал вопрос освоения технологии получения чугуна различных марок без использования в шихте чушковых чугунов и замене их стальным ломом 2А по ГОСТ 2786-75. Были проведены опытные плавки с использованием в шихте чушкового чугуна и без него. Пробы на определение химических элементов в металле отбирались из заливочного ковша в начале и в середине разливки плавки. Были получены следующие результаты: плавка № 50114 с использованием в шихте чушкового чугуна:

№ пробы	C	Mn	Si	S	P	Cr
1 проба	3,12	0,70	2,34	0,040	0,070	0,23
2 проба	3,34	0,72	2,29	0,029	0,070	0,10

Получены механические свойства:

1 проба: $\sigma_b=25,4$ кгс/мм², HB=197

2 проба: $\sigma_b=25,4$ кгс/мм², HB=197

плавка № 50114 с заменой чушковых чугунов стальным ломом и использованием науглероживателя:

№ пробы	C	Mn	Si	S	P	Cr
1 проба	3,12	0,70	2,14	0,040	0,073	0,24
2 проба	3,36	0,75	2,34	0,031	0,074	0,10

Получены механические свойства:

1 проба: $\sigma_b=32,4$ кгс/мм², HB=229

2 проба: $\sigma_b=29,9$ кгс/мм², HB=212

Полученные результаты по химическому составу чугуна и его механическим свойствам свидетельствуют в пользу работы без использования в шихте чушковых чугунов, причем, стоимость 1 т такой шихты на более чем 4 тыс. руб. дешевле шихты с чушковыми чугунами.

Было проведено 2 опытные плавки углеродистой стали в печи постоянного тока ДППТ-5АГ для определения скорости удаления углерода и фосфора. Первая плавка без скачивания шлака, вторая со скачиванием шлака сразу после расплавления шихты. Пробы отбирались через 5 мин. В первом случае получены такие результаты:

№ пробы	Содержание углерода, %	Содержание фосфора, %
1 проба	0,211	0,0241
2 проба	0,146	0,0252
3 проба	0,130	0,059

Некоторый рост содержания фосфора в металле объясняется восстановлением его из шлака при перегреве ванны. Температура шлака при скачивании составила 1580-1600 °С.

Во втором случае:
Сразу после скачивания шлака:

№ пробы	Содержание углерода, %	Содержание фосфора, %
1 проба	0,268	0,00423

После наведения нового шлака с основностью $\approx 2,2$:

№ пробы	Содержание углерода, %	Содержание фосфора, %
2 проба	0,143	0,00382
3 проба	0,153	0,00534

Некоторое увеличение содержания углерода и фосфора в третьей пробе объясняется диффузионным насыщением металла углеродом при раскислении шлака молотым коксом и восстановлением фосфора из шлака при нагреве металла.

Таким образом, при выплавке стали в печи постоянного тока эффективно проведена дефосфорация металла с 0,0241 содержания фосфора без скачивания шлака и до 0,00382 со скачиванием шлака. Определенно, что сталелитейное производство не имеет смысла оснащать кислородным оборудованием, поскольку скорость обезуглероживания при рудном кипении составляет 0,1 % за 3-4 минуты в ДППТ и проходит с резко сниженным уровнем пылегазовыбросов [3].

Эффективное науглероживание синтетического чугуна и эффективная дефосфорация стали объясняется постоянным перемешиванием металла в печи постоянного тока.

Сравним влияние перепада на качество в ДППТНП и ДСП также на примере стали 110Г13Л, производство которой ведет ОАО "Курганмашзавод".

Были проведены сравнительные испытания стали 110Г13Л ГОСТ 977-88, выплавленной в печи ДС-5МТ (плавки 1 и 2) и в печи ДППТ-5АГ (плавки 3 и 4) на изгиб, твердость и микроструктуру.

Результаты испытаний приведены в таблицах 1, 2, 3.

Химсостав стали 110Г13Л.

Таблица 1

№ плавки	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
1 ДС	1,36	12,08	0,62	0,005	0,060	0,54	0,22
2 ДС	1,38	11,81	0,55	0,002	0,060	0,61	0,22
3 ДППТ	1,35	12,46	0,65	0,002	0,057	0,47	0,25
4 ДППТ	1,36	11,99	0,73	0,003	0,053	0,42	0,27

Механические свойства

Таблица 2

Номер плавки	Стрела прогиба, мм	Твердость, НВ
1 ДС	2,8	255
2 ДС	2,5	269
3 ДППТ	3,6	269
4 ДППТ	4,4	269

Условия испытания на изгиб при постоянной нагрузке 6 т, расстояние между опорами 200 мм.

Результаты металлографического исследования*

Таблица 3

Номер плавки	Балл аустенитного зерна	Балл по карбидам
1 ДС	2	2а
2 ДС	2-3	2а

3 ДППТ	1	2а
4 ДППТ	1	2а

* Оценка произведена по шкале контроля микроструктуры траков после закалки.

Испытания траков, изготовленных из стали 110Г13Л, выплавленной в ДППТ в реальных условиях выявили в разы увеличенную их износостойкость.

При плавках на ДППТ-5АГ из-за низкого угара металла практически не образуется первичный шлак, что позволяет формировать шлак высокого качества, который в условиях интенсивного перемешивания активно взаимодействует с металлом. За счет ускорения ведения технологических процессов на печи достигнуто так же сокращение времени выплавки углеродистых сталей со 150 до 80 мин. при значительном улучшении их качества.

В ряде производимых на ОАО «Курганмашзавод» находятся стали типа ХНЛ и хладостойкая сталь 30ХМЛ. Первая, предназначенная для производства литой заготовки для запорной арматуры. В мире литая заготовка выпускается на давление до 150 атм., на ОАО «Курганмашзавод» освоено производство литой заготовки на давление 400-750 атм. Основой повышения механических свойств явилось широкое использование различных комбинаций модификаторов и плавка в ДППТНП. Подробнее свойство, а в особенности содержание растворенных газов – азота и водорода исследовалось в стали 30ХМЛ.

Образцы для испытаний изготавливались из клиновых проб. Все исследуемые плавки были предварительно раскислены алюминием в количестве 0,1 % по массе. Состав и количество использованных модификаторов приведены в табл.4.

Варианты модифицирования

Таблица 4

№ образца	Количество добавок модификаторов, вес. %		
	СК25	ФС30РЗМ30	ФСМг7
1	0,20	-	-
2	-	0,10	-
3	-	0,15	-
4	0,10	0,20	-
5	0,20	0,10	0,10
6	0,20	0,10	0,20

Химический состав образцов приведен в табл.5.

Содержание химических элементов в образцах из клиновых проб, %

Таблица 5

№ обр.	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Al
1	0.26	0.41	0.44	0.024	0.031	0.83	0.15	0.22	0.11	0.065
2	0.25	0.38	0.32	0.039	0.031	1.00	0.17	0.21	0.17	0.047
3	0.25	0.37	0.31	0.040	0.032	1.02	0.16	0.21	0.14	0.079
4	0.31	0.57	0.46	0.033	0.032	1.24	0.14	0.21	0.13	<0.01
5	0.32	0.76	0.53	0.028	0.025	0.92	0.11	0.22	0.12	0.055
6	0.33	0.74	0.58	0.027	0.024	0.91	0.11	0.21	0.12	0.058

Результаты анализа содержания водорода и азота в образцах приведены в табл.6.

Содержание газов в образцах, в %

Таблица 6

№ образца	Азот	Водород
-----------	------	---------

2	0,0145	0,00032
3	0,0125	0,00031
4	0,0150	0,00030
5	0,0090	0,00028
6	0,0011	0,00024

Эти результаты позволили добиться предельно высоких механических характеристик металла, ударная вязкость равна 1,0-1,4 МДж/м² вместо 0,6-0,7 МДж/м² после переплава в ДСП (в термообработанном состоянии).

На ОАО "Курганмашзавод" в электродуговых печах ДС-5МТ выплавлялись серые чугуны различных марок от СЧ15 до СЧ30 включительно и ВЧ40-ВЧ70.

Содержание перлита в СЧ30 возрастает с возрастанием марки от П45, Ф55 до П в СЧ30.

Плавка исходного чугуна для ВЧ осуществляется в дуговой печи с основной футеровкой.

С внедрением в производство дуговой печи, работающей на постоянном токе, значительно облегчился и ускорился процесс десульфурации за счет перемешивания металла и его активного взаимодействия со шлаком, основность которого составляет более 2,0.

В результате мы всегда имеем содержание серы в исходном чугуне не более 0,01 %, что позволяет уменьшить расход магниевой лигатуры до 1,0-1,2 %.

За счет глобулизации неметаллических включений в ЧШГ заметно возрастают механические и пластические свойства. Так чугун со следующим 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 кгс/мм², а относительное удлинение 12,0 %.

Чугун следующего химического состава: С=3,23; Si=2,65; Mn=0,58; S=0,004; P=0,06; Cr=0,17; Ni=0,06 имеет предел прочности 68,0 кгс/мм², а относительное удлинение 8,4 %.

Кроме таких технологических преимуществ печи постоянного тока ДППТ-5АГ перед печью переменного тока ДС-5МТ, получены значительные преимущества технико-экономических и экологических показателей. Так, расход графитированных электродов с 5,5 кг/т в печи ДС-5МТ снизился до 1,4-1,7 кг/т в печи ДППТ-5АГ. Угар металла снижен с 6,0-6,5% в печи переменного тока до 0,5-1,0% в печи постоянного тока. Замеры выбросов пыли при плавке стали 110Г13Л в ДППТ-5АГ составили [3].

Выбросы	Выбросы, г/с	ПДВ
Пыль	0,7914	0,9853
В т.ч. марганец	0,026562	0,1486

Колебания мощности нагрузки при расплавлении снизились более чем на 80 %. Увеличение слива металла из печи ДППТ-5АГ в сравнении с ДС-5МТ, за счет снижения угара шихты ≈ 40 кг на 1 т. Уровень шума снижен до 93-95 дБА. [2]

Все преимущества плавки привели к повышению качества литых заготовок запорной арматуры для нефтегазового комплекса из конструкционных углеродистых и легированных сталей, а также получены данные повышения качества литых заготовок из серого чугуна и чугуна с шаровидной формой графита.

На ОАО "Курганмашзавод" намечается дальнейшая реконструкция плавильных печей, работающих на переменном токе, с переводом их на постоянный ток, а также установка новых печей для плавки сплавов на основе алюминия, чугуна, специальных сплавов.

Список литературы:

1. В.С. Малиновский, Ф.Е. Дубинская. Техничко-экономические и экологические аспекты альтернативных технологий плавки металла в дуговых печах. Электromеталлургия, 1999г., № 3, с. 8-16.
2. В.С. Малиновский "Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления". Патент РФ № 2104450.
3. А.В. Афонаскин, И.Д. Андреев и др. Результаты первого этапа освоения дугового плавильного агрегата постоянного тока нового поколения на ОАО "Курганмашзавод". Литейное производство, 2000г., № 11, с. 20-23.