История развития электросталеплавильного производства

Возможность использования электрической дуги для плавления металлов была показана еще в 1803 году В.В. Петровым, получившим впервые дугу с помощью большой батареи гальванических элементов [1].

Первые дуговые печи прямого действия для плавки стали были построены Эру в 1899 году. Их конструкция была проста: в прямоугольную вытянутую ванну сверху через отверстие в съемном своде входили два электрода, закрепленных в электрододержателях, перемещающихся вверх и вниз вдоль вертикальных стоек – так регулировался ток дуги. Печь загружали через торцевые дверки, металл сливали при ее наклоне через летку. Основными недостатками этих печей были невысокое рабочее напряжение и, следовательно, малая удельная мощность. Это удлиняло период плавки, увеличивало тепловые потери и расход электроэнергии. Тем самым основные преимущества печей прямого действия – возможность концентрации больших мощностей и ускорение плавки – использованы не были.

Большое значение для развития дуговых сталеплавильных печей имело появление в 1910–1920 годах свинчиваемых непрерывных угольных, а затем и графитированных электродов.

Одним из серьезных факторов, снижающих показатели работы печей, была ручная завалка печи [2]. Так, средняя продолжительность простоя печи, если считать от выпуска из нее металла до следующего включения тока, составляла для 3-тонной печи 40 мин, для 6-тонной – 60 и для 15-тонной – 120 мин. Каждая минута простоя между плавками увеличивает тепловые потери излучением и расход энергии при расплавлении завалки. Поэтому понятно стремление конструкторов механизировать завалку шихты. Первым этапом такой механизации явилось использование мостового крана. Электрод печь загружалась при помощи лотка, подвешенного на цепях к крюку мостового крана. Несмотря на недостатки этого способа, он значительно ускорял завалку и облегчал труд рабочих. На следующем этапе использовались загрузочные машины, применявшиеся в мартеновском производстве. Эти машины производили завалку с помощью мульд. Но они были дорогие, а длительность завалки уменьшалась всего до 15...40 мин, в зависимости от емкости печи.

Кардинальное решение механизированной загрузки шихты в печь – загрузка сверху бадьей – было найдено в 20-х годах XX века рядом американских и европейских фирм («Лектромелт», «Америкен-Бридж», «Демаг», «Сименс», «Эфко» и др.). Были разработаны и применялись на практике три основных конструктивных решения: печи с поворотным сводом, с отъезжающим кожухом и с отъезжающим сводом. До начала второй мировой войны во всех странах строились печи всех трех типов. Однако после войны преимущественное распространение получили печи с поворотным сводом как наиболее удобные в эксплуатации и имевшие наименьшую массу металлических конструкций.

Загрузка печи сверху явилась одним из важнейших событий в развитии ДСП. Загрузка скрапа продолжается 3...5 мин, что в 5...10 раз быстрее (в зависимости от емкости печи), чем загрузка мульдами. Загрузка шихты через

верх позволяет также значительно лучше использовать объем печи. При загрузке через верх заполняется весь объем печи до верхнего края стен, а при загрузке мутьдами через рабочее окно – только до 60 % этого объема. В результате уменьшается число дополнительных подвалок при загрузке легковесного скрапа.

В начале 40-х годов XX века в ДСП было внедрено несколько принципиальных новшеств, которые позволили существенно повысить их технико-экономические показатели.

В целях интенсификации процесса плавки стал широко внедряться метод ввода кислорода в жидкий металл. Этот метод, предложенный инженером К.Г. Трубиным в 1926 году, был впервые опробован в СССР на металлургическом заводе «Красное Сормово» в 1932–1933 годах в мартеновских печах. Введение кислорода позволило повысить производительность ДСП примерно на 15 %. Такие же результаты были достигнуты в зарубежных странах.

1. Внедрение электрометаллургии стали в России

В 1907–1908 годах по инициативе начальника Обуховского сталелитейного завода в Петербурге (ныне завод «Большевик») Л.П. Меллера было решено установить на этом заводе электрическую печь для выплавки стали высшего качества [2]. Для выбора типа печи была командирована за границу комиссия, в ее состав были включены металлург завода М.С. Паустов, главный химик В.А. Яковлев и консультант завода профессор Горного института В.Н. Липина (в дальнейшем член-корреспондент АН СССР).

Ознакомившись детально с устройством и работой печей Стассано, Жиро, Эру, Челлина, Рохлинг–Роденгаузз и других изобретателей, комиссия согласилась с предложением В.Н. Липина и остановила свой выбор на печи типа Эру. Печь была пущена в эксплуатацию в феврале 1910 года. Эту дату можно считать датой начала промышленного производства электростали в России. Первая печь имела емкость 3,5 т и работала дуплекс-процессом с мартеновской печью. При работе на твердой завалке садка печи составляла 2,5 т. Печь питалась однофазным током от двигателя-генератора мощностью 500 кВт при напряжении (на печи) 90...100 В. Показатели печи на то время были высокими, удельный расход электрической энергии при работе на жидкой завалке составлял 280 кВт·ч/т и на твердой – 865 кВт·ч/т. Печь успешно работала до 1930 года, когда она была заменена другой печью.

Вслед за Обуховским заводом и другие заводы России начали устанавливать электросталеплавильные печи. Среди них Сормовский завод в Нижнем Новгороде, установивший печь Эру емкостью 3 т (она была установлена в фасонно-литейном цехе, питалась от генератора переменного тока 500 кВт, 25 Гц), Путиловский (ныне Кировский) завод в Петербурге – 7-тонную печь Жиро, Макеевский металлургический завод в Донбассе – печь Эру емкостью 3,5 т и др.

Первый в России специализированный электросталеплавильный цех был построен в 1916–1917 годах под Москвой, на заводе купца Второва в г. Богородске (ныне – г. Электросталь), цех был оборудован четырьмя ан-

глийскими печами типа Эру емкостью по 1,5 т. В эксплуатацию этот завод был введен уже при советской власти и получил наименование «Электросталь». Первая печь была введена в эксплуатацию в ноябре 1917 года. Перед первой империалистической войной в 1913 году в России было выплавлено 3500 т электростали.

Датой зарождения советского электропечестроения следует считать 1924 год, когда в Харькове на заводе «Электросила» (ныне ХЭМЗ) была создана небольшая группа во главе с Л.И. Ароновым и А.П. Ионовым. В течение года были спроектированы, изготовлены и смонтированы на ХЭМЗ две первые ДСП емкостью 250 кг. В основу проекта советских печей были положены более прогрессивные технические решения, чем это имело место в заграничных установках, иностранная техника пришла к советским электроплавильщикам позднее.

Основные особенности первых советских печей заключались в следующем:

- 1) высокое значение удельной мощности печи – до 800 В·А/кг;
- 2) наличие нескольких рабочих напряжений для применения в разные периоды плавки;
- 3) высокое значение рабочего напряжения в период расплавления (до 250 В) более высокое, чем на любой печи этого времени за границей;
- 4) применение графитовых электродов (впервые в СССР).

В декабре 1925 года была пущена в эксплуатацию печь № 1, в январе 1926 – печь № 2. Эксплуатационные показатели первых советских печей, сделанных целиком из отечественных материалов, были на уровне показателей зарубежных печей.

В 1927 году производство электропечей было перенесено в Москву, на «Электрозавод» (табл 1.1).

Таблица 1.1

Выпуск ДСП «Электрозаводом» за 1927–1934 годы

Емкость печей, т	Количество печей, шт	Общая емкость, т	Общая мощность, кВ·А
0,25	8	2,0	1 300
0,5	31	13,5	10 800
1,5...2,0	30	45,0	30 000
3,0...4,0	60	180,0	90 000
5,0...6,0	18	90,0	42 500
10,0...12,0	8	80,0	28 000
Итого:	155	410,5	202 600

«Электрозавод» по состоянию своего оборудования и кранового хозяйства, по имевшимся сборочным площадям и конфигурации своих зданий не мог изготавливать ДСП емкостью свыше 10...12 т. Даже печи меньшего тон-

нажа – 5 и 10 т – «Электрозавод» не имел возможности собрать у себя полностью и проверить действие механизмов. В 1935 году производство электропечей было передано на новый завод «Уралэлектромашина», в Свердловске, где изготавливали ДСП вплоть до лета 1941 года.

В 1945 году производственная база отечественного машиностроения была расширена созданием завода электротермического оборудования в Новосибирске (НЗЭТО). В мае 1959 года при НЗЭТО было организовано специальное конструкторское бюро (СКБ), которое тоже вошло в состав производственного объединения «Сибэлектротерм». Это позволило существенно увеличить долю изделий новой техники по разработкам собственного СКБ. При этом более полно учитываются технологические возможности оборудования, сложившаяся кооперация и организация производства.

Весь период своего существования производственное объединение «Сибэлектротерм» занимает ведущее место в стране по производству крупного электротермического оборудования, в том числе дуговых сталеплавильных печей емкостью 12...200 т.

Все вышеизложенное касается первого, самого длительного этапа в развитии дуговых сталеплавильных печей – с начала практического использования ДСП до середины 60-х годов XX века [3]. В этот период считали, что ДСП должна обеспечить полный цикл производства стали: расплавление шихты, рафинирование и нагрев металла. Из-за довольно высокой стоимости электросталеплавильного процесса в этот период дуговые печи использовали в основном для производства легированной стали специального назначения и лишь в литейных цехах в них выплавляли простую углеродистую сталь.

Удельная мощность трансформатора у дуговых печей составляла 200...300 кВ·А/т и в течение всего первого этапа изменилась незначительно. Наибольшая мощность используемых в этот период трансформаторов достигла 50 МВ·А, вторичное напряжение – 560 В, сила рабочего тока – 60 кА. Для питания ДСП использовали первичное напряжение 6, 10 и 35 кВ.

2. Концепция сверхмощной дуговой печи

Наиболее характерным для второго этапа развития конструкции ДСП (1965–1978 годы) является значительное повышение удельной мощности трансформатора. Утвердилось разделение ДСП по вводимой электрической мощности на нормальные (132...210 кВ·А/т), высокомошные (220...286) и сверхмощные (330...495 кВ·А/т).

Интенсивное вытеснение мартеновского процесса кислородно-конвертерным привело к нарушению баланса лома в металлургической промышленности и вызвало необходимость развития процесса с большими возможностями использования избытка лома. Таким процессом является плавка стали в дуговых печах, способных работать и при 100 % лома в металлической шихте. В связи с этим уже в 1960-х годах началось интенсивное и опережающее развитие электросталеплавильного производства. Особенно быстро оно нарастало (как по объему выплавляемой стали, так и по относи-

тельной доле в общем производстве) в США, где и появились первые сверхмощные дуговые печи.

Интенсификация плавки стали в дуговых печах вызвала необходимость коренного изменения хода процесса, возможности которого определяются физико-химическими условиями его протекания и требованиями к качеству стали. Последнее имело особое значение в связи с тем, что в дуговых печах выплавляли преимущественно специальные легированные и высоколегированные стали с повышенными, а часто и с особыми требованиями к свойствам.

Для получения стали относительно высокой степени чистоты при плавке в дуговых печах с трансформаторами малой мощности применяют «классическую» технологию со сменой шлака и продолжительным (до 70...100 мин) восстановительным периодом. При такой технологии в окислительный период плавки из металла окисляют углерод и фосфор с одновременной дегазацией и нагревом до температуры, превышающей температуру ликвидуса на 120...130 °С. Затем окислительный шлак скачивают и наводят новый, восстановительный, шлак присадками извести и порошков раскислителей (алюминия, ферросилиция, углерода). Задача восстановительного периода – получение готовой стали с низким содержанием оксидных и сульфидных включений.

Поскольку процессы диффузионного раскисления и десульфурации протекают на поверхности раздела шлак–металл, в условиях, когда скорость процессов контролируется переходом через эту поверхность, эффективность их развития снижается с уменьшением удельной поверхности ванны. Удельная поверхность уменьшается с увеличением вместимости дуговых печей [4] и для 100-тонных печей составляет 0,2 м²/т, что на 2...3 порядка меньше, чем при внепечной обработке стали, поэтому с увеличением вместимости дуговых печей эффективность диффузионного раскисления и десульфурации восстановительным шлаком уменьшается. Эффективность рафинирования металла от кислорода и серы в восстановительный период плавки в печах большой вместимости уменьшается или не имеет места вследствие и других особенностей работы таких печей:

1) трудности очистки и качественной заправки откосов и подины печи, что приводит к интенсивному разрушению футеровки ванны в восстановительный период с поступлением частиц футеровки в шлак и ухудшению свойств шлака;

2) недостаточно полного скачивания окислительного шлака из печи и попадания части его в рафинировочный шлак;

3) низкой степени герметизации печи и высокой степени окисленности печной атмосферы (до 10 % O₂ и до 2 % CO₂), затрудняющей раскисление шлака в восстановительный период плавки.

Таким образом, рафинирование стали в восстановительный период плавки в дуговых печах большой вместимости по физико-химическим условиям протекания процессов неэффективно, и проведение этого периода нецелесообразно. Обобщение результатов исследований показало, что без ухудшения качества стали, в частности, по загрязненности ее продуктами раскис-

ления, плавку в большегрузных печах (100 т) можно вести без восстановительного периода – под одним шлаком. Особые возможности дает внепечная обработка стали, позволяющая существенно улучшить качество стали. С помощью такой обработки возможно получение соответственно требованиям очень низких содержаний кислорода ($< 0,005\%$), серы ($< 0,002\%$), углерода ($< 0,02\%$). Все это позволило существенно изменить технологию плавки и имело важное значение для возникновения и развития сверхмощных дуговых печей.

Чтобы вводить в крупнотоннажную печь повышенную мощность, понадобились электроды диаметром d_3 , 555, 610 и даже 710 мм. В производстве и при эксплуатации электродов диаметром 710 мм возник ряд затруднений; массовое применение нашли электроды диаметром 610 мм, но при увеличении допустимой плотности тока до $25...35 \text{ А/см}^2$.

Первым сверхмощным дуговым печам (и самому названию «сверхмощные») было положено начало в 1963 году фирмой Northwestern Steel and Wire (США), где были построены две печи вместимостью по 135 т при мощности трансформаторов $70...80 \text{ МВ}\cdot\text{А}$, т. е. удельной мощности $520...600 \text{ кВ}\cdot\text{А/т}$ [4]. Печи имели производительность в слитках 55 т/ч, на их основе были созданы сверхмощные печи, которые получили широкое распространение в сталеплавильном производстве к концу 1960-х годов. Сверхмощные дуговые печи первого поколения при вместимости $50...150 \text{ т}$ имели удельную мощность трансформаторов $400...500 \text{ кВ}\cdot\text{А/т}$. Для уменьшения воздействия дуг на футеровку стен диаметр распада электродов стремились уменьшить, а для уменьшения износа огнеупорного свода высоту его над уровнем ванны увеличить. Производительность печей вместимостью 70 т составляла 35 т/ч, а печей вместимостью 100 т – $40...50 \text{ т/ч}$.

Реализация концепции высокомошной (сверхмощной) печи потребовала существенного сокращения продолжительности технологических операций, проводимых с отключением дуги, и увеличения доли времени работы печи на максимальной мощности [3]. Были введены регламентирующие работу печи понятия: коэффициент использования времени $K_{и} = \tau_{\text{вкл}} / \tau_{\text{общ}}$ ($\tau_{\text{общ}}$ – продолжительность плавки общая, $\tau_{\text{вкл}}$ – продолжительность работы печи под током), который должен быть не менее 0,7, и коэффициент использования максимальной мощности $K_{\text{мм}}$, равный отношению продолжительности работы печи на максимальной мощности к общей продолжительности нахождения печи под током, $K_{\text{мм}}$ также должен быть не менее 0,7.

Производительность ДСП повысилась в $1,5...2$ раза, уменьшился расход электроэнергии и электродов, существенно снизилась себестоимость стали. Такие агрегаты получили широкое распространение в мире. Резко увеличилась выплавка электростали и ее доля в общем объеме производства стали.

Но повышение мощности дуг оказало отрицательное воздействие на работу ряда элементов ДСП, особенно на футеровку стен и свода.

Одним из шагов на пути уменьшения тепловой нагрузки на стены стало уменьшение диаметра распада электродов (d_p). Отношение d_p/d_3 с $2,5...3$ уменьшилось до $2...2,2$. Из-за большой мощности, выделяющейся в дугах,

при уменьшении распада электродов удалось получить общий «колодец» в центре печи при плавлении шихты и исключить возможность повреждения подины дугами. Для уменьшения теплового излучения на стены и свод было предложено работать на коротких дугах. Основная заслуга в разработке режимов работы высокомошных ДСП, обеспечивающих полное погружение дуг в шлак, также принадлежит американским ученым W.E. Schwabe и C.G. Robinson. Однако короткие, погруженные в шлак дуги не решали в полной мере проблему стойкости футеровки, так как в конце плавления стены уже не экранировались ломом, достаточного количества шлака в ванне еще не было и приходилось снижать вводимую в печь мощность.

Поэтому для уменьшения износа футеровки предложили использовать водяное охлаждение. Вначале холодильники и водоохлаждаемые панели устанавливали лишь в «горячих» точках стен, напротив дуг, где наблюдался наибольший износ футеровки стен, затем создали ДСП с полностью водоохлаждаемыми стенами, а позднее – с водоохлаждаемым сводом. Первые такие высокопроизводительные печи емкостью вначале 50 т (в 1973 году), затем 140 т (1975 году) ввели в эксплуатацию в Японии на заводе фирмы «Тосин Сэйко». Следует отметить, что первая полностью водоохлаждаемая электропечь емкостью 1,5 т с 1959 года длительное время находилась в эксплуатации на Красногорском заводе цементного машиностроения. Водоохлаждаемый свод кессонного типа был впервые разработан специалистами Московского вечернего металлургического института (МВМИ) и внедрен в 1972 году на 10-тонной электропечи завода «Сибэлектросталь». Однако водоохлаждаемые панели трубчатой конструкции для стен и сводов оказались надежнее и эффективнее, поэтому получили быстрое распространение на высокомошных печах. Вместе с тем водоохлаждаемые стены и свод стали причиной повышения тепловых потерь, причем с увеличением длительности жидкого периода плавки тепловые потери становились больше.

Это послужило толчком к дальнейшей интенсификации плавки, сокращению ее длительности и внедрению внепечной обработки стали. Первоначально использовали варианты внепечной обработки стали, не предусматривающие подогрева металла в ковше: обработку металла синтетическими шлаками, твердыми шлаковыми смесями (ТШС) и продувку инертным газом в ковше во время выпуска, вакуумную обработку, обработку на установках доводки металла (УДМ) и др. Использование технологии обработки указанных вариантов требовало повышенной температуры стали (на 60...80 °С) при выпуске из плавильного агрегата, что являлось причиной увеличения продолжительности плавки, перерасхода электроэнергии (топлива), снижения стойкости футеровки сталеплавильного агрегата.

Первая 30-тонная установка дугового нагрева для обработки стали фирмы ASEA-SKF, введенная в эксплуатацию в 1965 году в г. Хеллефорсе (Швеция), была вначале воспринята как своего рода экзотика. Но оказалось, что ситуация как раз созрела для широкого внедрения таких установок. Вскоре в дополнение к дуговому нагреву подобные установки стали оснащать специальными технологическими устройствами.

3. Внедрение внепечной обработки стали

Третий период в развитии электросталеплавильного производства (1978–1992 годы) связан с широким внедрением внепечной обработки стали и основной установки, используемой для этой цели, – агрегата ковш-печь (АКП) [3]. Кроме дугового нагрева металла на АКП проводят операции, связанные с рафинированием и доводкой расплава по химическому составу и температуре.

Использование внепечной обработки позволило резко сократить продолжительность периода доводки стали в печи. Обязательными операциями «жидкого» периода остались: дефосфорация металла, кислородная продувка ванны для снижения содержания углерода менее нижнего заданного предела, нагрев металла до температуры выпуска, иногда легирование стали некоторыми тугоплавкими элементами и предварительное раскисление.

Сокращению продолжительности жидкого периода во многом способствовало создание системы весового дозирования загружаемых в печь через свод фракционированных шлакообразующих компонентов и ферросплавов без отключения печи. Такие бункера для извести с затвором и течкой одними из первых были установлены на 20-тонной электропечи ЭСПЦ № 1 металлургического завода «Красный Октябрь». Широкое внедрение автоматизированных систем с 6...14 бункерами, вибропитателями, дозированием материалов и подачей их в печь через отверстие в своде пришлось на период 1978–1992 годов.

Для сокращения продолжительности плавления устанавливают оконную и стеновые газокислородные горелки. Число стеновых горелок мощностью по 3...3,5 МВт достигает 4...6. Известна установка в стенах электропечи 8 горелок. Это позволило сократить продолжительность плавления в 100-тонных электропечах до 50...70 мин и снизить расход электроэнергии до 380...420 кВт·ч/т.

На третьем этапе развития ДСП продолжалось совершенствование конструкции отдельных узлов и элементов печи. Повсеместное использование гидропривода на механизмах высокомошных ДСП стало нормой для всех электропечестроительных фирм. В 1988 году фирмой «Даниели» впервые была реализована идея электропечи с высоким корпусом и двумя рядами стеновых панелей, что обеспечивало загрузку лома в один прием. Среди наиболее важных усовершенствований отдельных элементов конструкции следует выделить электрододержатели с токоведущим рукавом. Первые такие электрододержатели были разработаны фирмой «Фукс Системтехник» и установлены в 1984 году на 35-тонной электропечи на заводе Azma в Испании. Рукава электрододержателей были изготовлены из медносталльных листов, их применение позволило повысить жесткость и надежность электрододержателей, еще более уменьшить диаметр распада электродов и сократить потери электроэнергии. Известно использование также электрододержателей, у которых рукава выполнены из сплава алюминия, однако алюминиевые электрододержатели гораздо менее распространены, чем медносталльные.

Характерная особенность третьего этапа (1978–1992 годы) развития ДСП – широкое внедрение АСУТП, основные функции которых следующие:

- управление электрическим режимом плавки;
- контроль работы трансформатора, включая управление системой охлаждения и КРУ;
- контроль состояния всех механизмов и управление их работой с помощью программируемых контроллеров;
- контроль работы водоохлаждаемых элементов печи;
- управление подачей в печь шлакообразующих и легирующих компонентов;
- управление работой газокислородных горелок и кислородных фурм;
- контроль состояния подины и откосов;
- наблюдение за работой систем газоудаления и очистки газов;
- учет расхода энергоносителей, ведение протокола плавки, документирование всех отклонений и нарушений.

Кроме того, необходимо отметить ввод в эксплуатацию печей, работающих на металлизированных окатышах, и достаточно широкое распространение дуговых сталеплавильных печей постоянного тока (ДСПТТ).

4. Новейшие технологические приемы ведения плавки

Четвертый этап развития ДСП (начиная с 1992 года) связан с совершенствованием технологии ведения плавки с жидким остатком, освоением технологии плавки под вспененным шлаком, улучшением электрического режима, а также внедрением ряда нововведений в конструкцию печи и технологию плавки, позволяющих существенно повысить эффективность работы печи и уменьшить расходы по переделу [3].

В табл. 1.2 и 1.3 приведены данные, характеризующие дуговое сталеплавильное оборудование и его работу на данном этапе.

Технология работы с оставлением в печи жидкого остатка (10...15 % массы стали и всего шлака) нашла широкое применение на электропечах емкостью 25...350 т. Наличие жидкой «подушки» на подине позволяет вести плавку на высшей ступени напряжения без опасения повредить подину и начать раннюю продувку ванны кислородом. Дальнейшее совершенствование этой технологии свелось к подаче в ванну порошкообразного кокса и к периодической загрузке на поверхность ванны извести для поддержания высокой (2,5...3,0) основности шлака. Углерод, вдуваемый в расплав, окисляется частично закисью железа на границе фаз сталь–шлак и частично – напрямую кислородом. Образующиеся при этом пузырьки СО и СО₂ вспенивают шлак. К моменту «раскрытия» дуг вспененный шлак покрывает всю поверхность ванны, почти полностью экранирует дуги, и таким образом исключается прямое облучение нижней части стен, свода и панелей дугами. Выделяющееся в дугах тепло передается ванне, и жидкий металл быстро нагревается.

Таблица 1.2

Объем производства стали и доля способов выплавки в 1999 году
в странах – основных производителях

Страна	Общий объем производства, млн т	Динамика производства, % к 1998 году	Доля способа выплавки и разливки, %			
			Конвертерный	ДСП	Мартеновский	МНЛЗ
Китай	123,3	+8,0	66,3	15,8	1,7 (16,2)*	68,9
США	97,2	-1,4	53,8	46,2	–	68,2
Япония	94,2	+0,7	69,5	30,5	–	97,2
Россия	49,8	+17,5	58,9	12,8	28,3	49,8
ФРГ	42,1	-44,5	70,8	29,2	–	96,3
Южная Корея	41,0	+2,9	58,4	41,6	–	98,7
Украина	27,0	+12,3	52,4	4,4	43,2	19,5
Бразилия	25,0	-3,0	78,1	21,9	–	88,2
Италия	25,0	-3,1	42,2	57,8	–	96,4
Индия	24,2	+3,5	53,9	32,1	14,0	50,9
Франция	20,2	+0,4	62,4	37,6	–	95,4

* – другие способы.

Таблица 1.3

Объемы выплавки стали в ДСП и изменения средних показателей плавки

Показатель	1990	1999	Δ, %
Выплавка стали, млн т:			
всего	769	787,7	2,43
в ДСП	215	262,8	22,2
Средняя масса стали на выпуске, т	86	110	27,9
Мощность трансформатора, МВ·А	60	80	33,3
Температура металла на выпуске, °С	1660	1635	-1,5
Продолжительность плавки от выпуска до выпуска, мин	105	70	-33,3
Расход электроэнергии, кВт·ч/т жидкой стали	450	390	-13,3
Общий расход кислорода, м ³ /т жидкой стали	24	30	25
Расход электродов, кг/т жидкой стали	2,9	1,9	-34,5
Расход огнеупоров, кг/т	7	3	-57,1

ДСП стали работать на более высоком вторичном напряжении. Первая дуговая сталеплавильная печь со вторичным напряжением 1100 В емкостью 90 т появилась в начале 1990-х годов на заводе Ferrier Nord в Италии. В настоящее время известны ДСП с высшей ступенью напряжения, равной 1350 В, и проектируются печи с вторичным напряжением 1600 В. Для обес-

печения стабильного горения дуг (особенно при повышении напряжения) широкое применение нашли дополнительные реакторы, как встроенные, так и подключенные к печному трансформатору.

Первой предложила оснащать ДСП дополнительными реакторами фирма «Даниели», и в настоящее время все выпускаемые этой фирмой печи оснащаются реакторами.

Четвертый этап развития ДСП характерен также широким использованием жидкого чугуна в электроплавке. В этом заключено несколько положительных моментов:

- используется физическое и химическое тепло чугуна;
- наличие большого количества углерода в чугуне позволяет использовать его для образования вспененного шлака и отказаться от вдувания порошкообразного кокса;
- при доле чугуна 23...30 % всей массы металлошихты снимается проблема цветных примесей в готовой стали.

Первые опыты по использованию чугуна при электроплавке стали проводили еще в 60-е годы XX века, но тогда применение жидкого чугуна не нашло широкого распространения из-за большой разницы в стоимости чугуна по сравнению с ломом. Кроме того, низкий темп электроплавки в тот период не позволял получить ощутимых энергетических выгод от применения чугуна.

С начала 1990-х годов жидкий чугун широко используют на крупнейших металлургических комбинатах России: Челябинском, Новокузнецком, Череповецком и Орско-Халиловском.

Наиболее выгодным считается применение в шихте 25...30 % жидкого чугуна; при этом удельный расход электроэнергии снижается на 80...100 кВт·ч/т. Без особых усложнений технологии электроплавки в шихте может быть использовано до 40 % чугуна.

Период 1990–2000 годов можно назвать десятилетием печей с шахтным подогревателем лома. Казалось, изобретение Г. Фукса найдет повсеместное применение. К 2000 году в мире действовало более 34 дуговых печей емкостью 70...220 т с шахтным подогревателем лома. Именно эти печи позволяли эффективно использовать тепло отходящих газов и экономить 80...100 кВт·ч электроэнергии на 1 т выплавленного металла. Однако дальнейшее их продвижение в производство приостановилось из-за повышения экологических требований, необходимости сжигания диоксинов и фуранов, на которое тратилось до 70 % энергии, сэкономленной ранее.

Тогда специалисты обратили внимание на печи, в которых реализован процесс Consteel. К концу 2004 года в мире насчитывалось 12 печей такой конструкции, в которых навстречу печным газам по специальной транспортной ленте движется металллом. Загрузка лома в жидкую ванну позволяет ускорить его плавление. Имеется возможность управлять энергетикой процесса и исключить образование диоксинов. Именно с этой конструкцией печи специалисты-электрометаллурги связывают перспективы использования тепла отходящих от ДСП газов.

Нагрев лома перед загрузкой в электропечь решает также проблему безопасности работы дуговых печей при загрузке лома с влагой, снегом, наледью. Эта проблема особенно остро стоит на металлургических предприятиях, расположенных севернее 40° параллели.

Изменилось также отношение к системе улавливания и удаления неорганизованных пылегазовых выбросов дуговых печей. Недостатки шумопылезащитных камер (часто называемых «дог-хауз») привели к тому, что их начали замещать герметичными защитными пролетами, переходящими в зонт над ДСП (называемых «элефант-хауз»). При такой компоновке ДСП исключаются выбросы в атмосферу, а повышенная запыленность околопечного пространства в отдельные периоды работы печи не оказывает отрицательного воздействия на обслуживающий персонал, так как большую часть времени люди находятся в помещении поста управления [5].

Последним нововведением на четвертом этапе развития ДСП можно считать провозглашенную в 2005 году фирмой ФАИ ФУКС концепцию дуговых печей нового поколения серии ULTIMATE. Это слово авторы концепции переводят как «достигший предела». Можно отметить следующие основные особенности печей этой серии:

- сверхвысокая электрическая мощность (≥ 1000 кВ·А/т), вводимая при высоком вторичном напряжении (до 1600 В);
- использование газокислородных горелок и внедрение новейших достижений инжекционных технологий, включающих вдувание в печь кислорода и углеродсодержащих материалов; альтернативными источниками вводится до 12 % и более необходимой для электроплавки энергии;
- увеличение высоты рабочего пространства (на 250-тонной печи – до 4,5 м от зеркала металла до верха стен), рассчитанное на завалку шихты одной бадьей и нагрев шихты отходящими газами;
- разъемная конструкция корпуса, наличие секций стальных водоохлаждаемых панелей в средней и верхней частях и медных панелей в нижней части кожуха с повышенными тепловыми нагрузками;
- система с оптическими датчиками для установки завалочной бадьи с шихтой в положение загрузки над печью;
- скоростная замена электрода мостовым краном с двумя вспомогательными крюками;
- наличие робота для очистки порога рабочего окна;
- устройство бесконтактного измерения температуры ванны металла;
- использование системы инфракрасного контроля отсечки шлака при выпуске металла из печи.

Авторы концепции ULTIMATE заявили о достижении предельной продолжительности периода плавления (22...24 мин) лома в крупных ДСП из-за ограничений, накладываемых процессами теплопередачи [4, 6].

5. Печи постоянного тока

Первые дуговые сталеплавильные печи, появившиеся в конце XIX века, были печами постоянного тока (ДППТ). Позже в течении многих десятилетий в черной металлургии доминировали дуговые сталеплавильные печи переменного тока (ДСП). К началу 70-х годов прошлого века электросталеплавильное производство во всем мире прочно заняло место одного из основных способов производства стали (доля электростали в наиболее развитых странах достигала 40 %); при этом всю электросталь выплавляли в печах переменного тока. К этому моменту максимальная емкость ДСП достигла 360 т, мощность печного трансформатора 160 МВ·А и часовая производительность единичных агрегатов превысила 120 т.

Однако к этому времени выявился и ряд недостатков ДСП переменного тока: высокий уровень шума, помехи в питающих сетях, низкий коэффициент мощности, большой расход электродов и др. Все это вновь пробудило интерес к дуговым печам постоянного тока.

Тем более, что в 70-х годах прошлого столетия развитие техники преобразования электрической энергии, появление источников постоянного тока высокой мощности создали предпосылки для строительства дуговых сталеплавильных печей постоянного тока (ДСППТ), способных при наличии определенных условий конкурировать с широко применяемыми дуговыми печами, работающими на переменном токе. При создании современных ДСППТ успешно использовали опыт, накопленный конструкторами и технологами в процессе освоения сверхмощных ДСП и разработанной для таких печей современной технологии плавки стали.

После первых положительных результатов ДСППТ на некоторое время получили широкое распространение. С 1985 по 1992 г. в разных странах ввели в эксплуатацию 26 печей емкостью от 20 до 150 т [7]. Пик популярности ДСППТ пришелся на 1995—96 гг. В технической литературе и патентных подборках 80 % всех материалов по дуговым печам относились к печам постоянного тока. Казалось, что дуговые печи переменного тока "доживают" последние дни.

Емкость печей постоянного тока достигла 220 т, а мощность источника питания — 160 МВт. Знаменитая печь фирмы "Токио Стил" при емкости 160 т и мощности источника 120 МВт работала с расходом электродов 1,1—1,3 кг/т, электроэнергии 340—360 кВт·ч/т и обеспечивала производительность до 180 т/ч [7]. Следует отметить, что при этом ничего не сообщалось о применяемых альтернативных источниках энергии. Печи постоянного тока имели эркерный выпуск, оснащались быстродействующими механизмами, АСУТП и современными средствами интенсификации плавки и внепечной обработки стали. По данным журнала "Новости черной металлургии за рубежом", в период 1991—95 гг. доля введенных в эксплуатацию ДСППТ составляла 89 % общего количества построенных электропечей. Однако уже несколько лет спустя обнаружилась противоположная тенденция [8]

Можно констатировать, что в период с 1996 по 1998 гг. произошел резкий спад интереса к дуговым печам постоянного тока. В табл. 5.1 показана

динамика ввода в эксплуатацию дуговых печей постоянного и переменного тока (по материалам, опубликованным в зарубежных информационных источниках и приведенных в журнале "Новости черной металлургии за рубежом").

Комментарием к этой таблице может служить сказанная главой фирмы "QuaLitetSteel" фраза: "Дуговые сталеплавильные печи постоянного тока как пришли, так и уйдут" [7].

В России в силу определенной инертности металлургов и финансовых затруднений в период перестройки печи постоянного тока практически не строили. По существу, на предприятиях черной металлургии к настоящему времени в эксплуатации находятся три ДСППТ: 12-т печь на ЧМК, 30-т — на "Ижстали" и 6-т печь на "Электростали". На машиностроительных заводах России для выплавки стали используют пять дуговых печей постоянного тока емкостью 3, 6, 12, 20 т [7]. Эти печи были введены в эксплуатацию собственными силами машиностроительных заводов с участием специализированных организаций при реконструкции старых дуговых печей переменного тока. В течение 1989—92 гг. в ОАО "Сибэлектротерм" были изготовлены шесть ДСППТ емкостью 12т для машиностроительных и металлургических предприятий и две 25-т печи для Абаканского вагоностроительного завода. Все они по разным причинам не работают. Можно отметить также попытки внедрить агрегаты ковш-печь на постоянном токе в конвертерном цехе Новолипецкого металлургического комбината и литейном цехе КамАЗа. Оба агрегата не введены в промышленную эксплуатацию.

Таблица 5.1. Ввод в эксплуатацию дуговых ДСП и ДСППТ.

Период	Введено в эксплуатацию		Подписаны контракты, выданы заказы на поставку	
	ДСП	ДСППТ	ДСП	ДСППТ
1991-1995 гг.	4	33	Нет сведений	Нет сведений
1996 г.	15	4	7	2
1997 -1998 гг.	7	3	6	3
1999 - 2000 гг.	6	1	6	0
2003 -2005	2	0	10	0

На самом деле происходит непрерывное совершенствование агрегатов обоих типов, направленное на устранение основных недостатков и тех и других. Естественно, что разработчики агрегатов постоянного тока стремятся доказать неоспоримость преимуществ своих разработок, а производители трехфазного электросталеплавильного оборудования путем совершенствования конструкций, энерготехнологических режимов работы, источников питания и систем автоматического управления печами добиваются сокращения отрыва от этих преимуществ и максимального использования достоинств ДСП.

Печи постоянного тока, созданные различными фирмами, в основном различаются количеством сводовых электродов-катодов и конструкцией токопроводящего узла–анода.

В подине дуговой печи можно размещать несколько изолированных от корпуса электродов и создавать печи большой мощности, подключая каждый источник электропитания к определенному подовому электроду.

Называют следующие преимущества печей постоянного тока по сравнению с печами переменного тока: меньший удельный расход электродов – на 50...60 %; снижение уровня фликера на 50 %, возможность подводить большую мощность, надежность электрооборудования; работа с длинными дугами; перемешивание ванны под воздействием электродинамических сил; упрощение технического обслуживания и сокращение трудозатрат; равномерная тепловая нагрузка на футеровку печи; снижение уровня шума на 15 дБ; стабилизация технологии; лучшее формирование колодцев при их проплавлении; снижение угара легирующих элементов; снижение содержания азота в стали; уменьшение газовыделения и пылеобразования; снижение расхода огнеупоров; повышение производительности.

Однако, несмотря на широко рекламируемые преимущества печей постоянного тока, некоторые фирмы предпочитают устанавливать новые высокоимпедансные трехфазные печи. Это обусловлено следующим:

- капитальные затраты на печь переменного тока ниже;
- суммарный расход электроэнергии практически одинаков;
- торцовый расход электродов и воздействие на питающую сеть высокоимпедансных трехфазных печей и печей постоянного тока сближаются, тем более, что для большегрузных ДППТ необходимо применять электроды большего диаметра для обеспечения требуемой величины вводимой мощности; по сравнению с электродами диаметром 600 мм цена электродов диаметром 700 мм выше на 20 %, а цена электродов диаметром 750 мм выше уже на 40 %; следовательно, для достижения суммарного снижения затрат экономия от снижения расхода электродов должна превосходить рост затрат в связи с увеличением их стоимости;
- ДППТ большой емкости оснащаются 2...4 преобразователями тока, что приводит к повышению капитальных затрат на обслуживание и к снижению надежности оборудования;
- подовые электроды требуют большого внимания, обслуживание их – отдельная статья в затратах на выплавку стали в ДППТ;
- применение технологии вспенивания шлаков позволяет и трехфазной ДСП работать с длинными дугами;
- печи переменного тока имеют большую гибкость регулирования температуры ванны.

Исследование дуг постоянного и переменного тока показало, что дуга постоянного тока характеризуется меньшим значением градиента потенциала в ее столбе, что для выделения в дуге требуемой мощности нужно увеличить ее длину до 0,8...1,0 м. После расплавления шихты это приводит к росту по-

токов излучения на стены и свод печи и увеличению тепловых потерь. Поэтому несмотря на более высокую, чем в трехфазных печах, скорость нагрева и расплавления металла дуговая печь постоянного тока не дает особых преимуществ по производительности. Кроме того, дуговой печи постоянного тока требуются специальные меры по предотвращению отклонения дуги из-за явления магнитного дутья. Ввод в электрическую цепь полупроводникового источника снижает надежность установок и повышает их стоимость.

Аналогично не отвечает электротехнологическим требованиям и дуга переменного тока. В начальный период плавки дуга имеет небольшую длину, что повышает вероятность эксплуатационных коротких замыканий и увеличивает расход энергии, усиливает влияние на питающую сеть. В то же время дуга непрерывно перемещается, что расширяет колодцы и снижает остроту проблемы перегрева подины. При расплавлении шихты дуга переменного тока более эффективна (без учета расхода электродов).

Исследования показали, что КПД дуг переменного тока в зависимости от электрического и шлакового режимов изменяется в пределах 0,55...0,85, КПД дуг постоянного тока – в пределах 0,40...0,75. Этим объясняется больший в некоторых случаях удельный расход электроэнергии в дуговых печах постоянного тока [9].

Показатели работы дуговых печей постоянного и переменного тока близки (за исключением расхода электродов). Ведущие фирмы, выпускающие дуговые печи постоянного тока, активно работают над совершенствованием конструкции трехфазных печей. В ближайшем будущем продолжится «соревнование» дуговых печей постоянного и переменного тока.

Определить явное преимущество печей постоянного или переменного тока в настоящее время не представляется возможным. Производители стали сами выбирать тип печи исходя из условий их эксплуатации, наличия или отсутствия мощных электросетей, обеспеченности металлошихтой различного вида и качества, топливом и кислородом и многих других факторов.

Список литературы

1. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева : учебник для вузов по спец. "Электротермические установки" / А. Д. Свенчанский [и др.] ; под ред. А. Д. Свенчанского. – М., 1981. – 296 с. : ил.
2. Шевцов М.С., Бородачев А.С. Развитие электротермической техники. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
3. Зинуров И.Ю., Гудим Ю.А. Этапы развития конструкции дуговых сталеплавильных печей // Электротехнология. – 2006. – № 10. – С. 9–15.
4. Поволоцкий Д.Я., Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю. Устройство и работа сверхмощных дуговых сталеплавильных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.
5. Лопухов Г.А. Анализ технико-экономических показателей работы традиционной дуговой печи и дуговой печи Consteel // Электротехнология 2010. - №7. - С. 45 - 46.
6. "Ultimate" - новое решение в области электросталеплавильного производства / У. Вильхельм, М. Хайн, В. Райле, М. Абель, Р. Шютт, // Электротехнология, 2010. - №1. - С. 7 - 13.
7. Зинуров И.Ю., Гудим Ю.А., Галян Б.С., Шумаков А.М. Дуговые печи постоянного тока в современном электросталеплавильном производстве. Электротехнология. 2005 г., 10, стр. 3-11.
8. Еланский Д.Г. Тенденции развития электросталеплавильного производства // Электротехнология. – 2001. – № 5. – С. 3–19.
9. Лопухов Г.А. Передовые технологии электросталеплавильного производства // Электротехнология, 1999. – № 8. – С. 2–40.