

УДК 660.046.4:669.187.2

РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАВКЕ

Л. Е. РОВИН

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

С. Л. РОВИН

*Научно-производственное республиканское дочернее
унитарное предприятие «Технолит», г. Минск,
Республика Беларусь*

Введение

Среди способов интенсификации и ресурсосбережения при электроплавке особое место занимает предварительный подогрев шихты. В последние годы разработан ряд конструкций как встроенных, так и автономных устройств подогрева, с использованием тепла печных газов и/или природного газа. Установки различаются по температуре нагрева, удельной производительности и экологическим характеристикам. В статье представлен аналитический обзор известных устройств, предложены критерии выбора оптимальных технических решений, сделан вывод о перспективности применения высокотемпературного подогрева шихты, в том числе в загрузочных бадах нового типа, что позволит применить способ для существующих печей без остановки производства и крупных капиталовложений.

Эффективность способов ресурсосбережения

Интенсификация технологических процессов – наиболее перспективное направление в ресурсосбережении и повышении экономической эффективности плавки. Metallургами за последние десятилетия разработан ряд технических решений (приемов), которые обеспечили существенное повышение производительности печей, снижение энергоемкости и эксплуатационных затрат, улучшение экологических характеристик плавки и качества полученного металла.

На рис. 1 представлены лишь некоторые из наиболее значимых мероприятий, внедрение которых привело за последние годы к сокращению удельных затрат электроэнергии при дуговой плавке в 2,5 раза, расхода электродов в 4,3 раза, продолжительности плавильной кампании почти в 5 раз. При всей условности приведенных зависимостей, интерполированных до 2015 г., можно заметить, что если технологические возможности плавки – показателями чего являются производительность (длительность кампании) и удельный расход электродов – близки к максимально возможным для ЭДП, то в отношении удельных затрат электроэнергии перспективы далеко не исчерпаны.

При этом следует отметить, что теоретический предел – сумма энтальпии жидких стали и шлака – «преодолен», т. е. удельные затраты электроэнергии уже ниже суммарного значения энтальпии получаемых расплавов 420–480 кВт · ч/т. Дефицит энергии компенсируется ростом термического КПД печей и увеличением вносимой доли тепла от более дешевых источников: уголь, природный газ, тепловая энергия отходящих газов (ВЭР).

Сравнительный анализ эффективности известных способов сокращения удельных затрат электроэнергии на плавку дает ориентировочно следующее соотношение (при общих затратах ~ 650–680 кВт · ч/т): дожигание СО непосредственно в рабочем пространстве путем дополнительной подачи воздуха или кислорода – 6 %, работа на вспененных шлаках – 9 %, повышение удельной мощности печных трансформаторов (работа на длинных дугах) – 10 %, вдувание кислорода в ванну металла (с корректировкой углеродосодержащего компонента) – 10 %, использование в завалке жидкого чугуна – 10 %, использование топливно-кислородных или плазменных горелок – 12 %, высокотемпературный подогрев шихты – до 22 %.

При этом эффект высокотемпературного подогрева шихты (ВПШ) очевидно пропорционален температуре нагрева или энтальпии загружаемых материалов. Верхний предел может быть ограничен только опасностью угара тонколистового скрапа при длительном нагреве свыше 700 °С в окислительной среде или свариванием кусков скрапа при температурах выше 900–1000 °С.

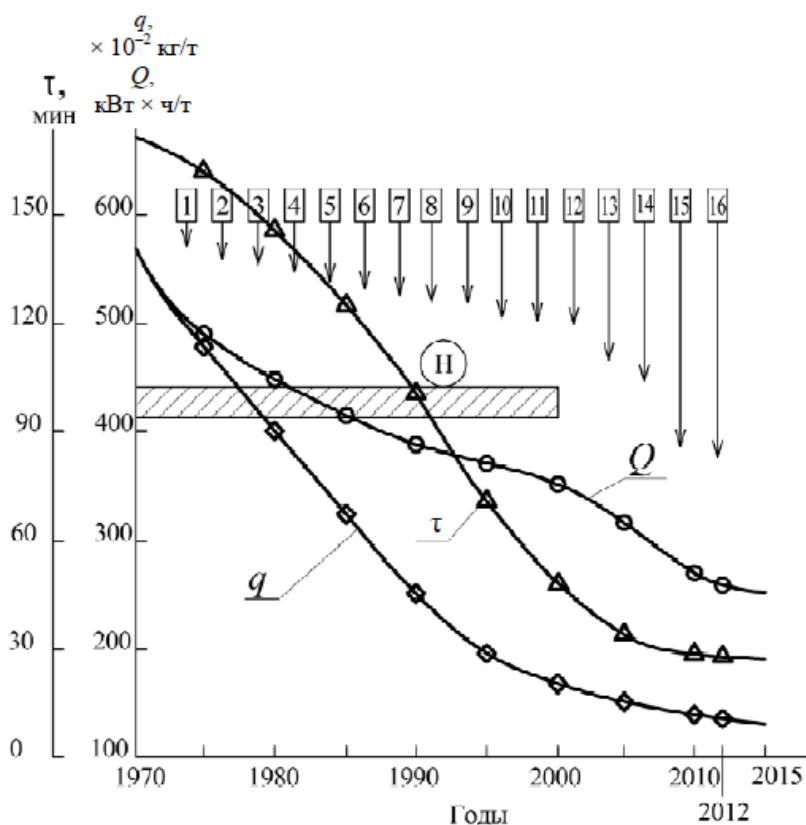


Рис. 1. Влияние методов интенсификации на основные технико-экономические параметры выплавки стали в электродуговых печах: τ – продолжительность плавки; q – удельный расход электродов; Q – удельный расход электроэнергии; H – суммарная энтальпия жидких стали и шлака, кВт; 1–16 – методы интенсификации, соответственно: применение кислорода; жидкая завалка; внепечная обработка; водоохлаждаемые панели; повышение мощности трансформаторов (сверхмощные печи); компьютеризация (АСУ ТП); вспененные шлаки; газокислородные горелки; донный выпуск; печь-ковш; эркерный выпуск; подогрев скрапа (сушка); фурмы-манипуляторы; донная продувка; высокотемпературный подогрев шихты; комплексные плавильные агрегаты с непрерывным подогревом шихты

Технологическая привлекательность подогрева шихты как способа улучшения технико-экономических параметров электроплавки заключается еще и в том, что он не требует изменений в технологии.

Подогрев шихты для электропечей – средство универсальное, он актуален как для крупных металлургических печей, в том числе сверхмощных, несмотря на их высокую удельную мощность и интенсивность процесса плавки, так и для небольших по емкости плавильных агрегатов литейных цехов. Подогрев шихты эффективен не только для электродуговой плавки чугуна и стали, но также и для индукционных тигельных печей, применяемых для выплавки черных и цветных сплавов [1], [2].

Экономия электроэнергии при использовании подогрева шихты определяется не только количеством тепла (величиной энтальпии), вносимого в печь с горячей шихтой, но и соотношением коэффициентов теплоиспользования (КПД).

Термический КПД ЭДП равен примерно $\eta \approx 0,6$, изменяясь по ходу плавки от 0,4 при нагреве шихты до 0,8 при нагреве жидкой ванны. КПД установок ВПШ оптимальной конструкции достигает 0,80–0,85, при этом в начальный период работы при холодной шихте η достигает 0,95.

На рис. 2 представлены сопоставимые данные по затратам энергии в установках ВПШ, работающих на природном газе с теплотворной способностью $q = 35000$ кДж/м³, и ЭДП. Еще более очевидным становится экономический эффект ВПШ при использовании стоимостных показателей: стоимость 1 кВт · ч электроэнергии в Республике Беларусь равна ~ 1115 р. (в ценах 2012 г. для промпредприятий), а такое же количество тепловой энергии, полученной от сжигания природного газа, – около 250 р., что дает соотношение затрат на получение 1 кВт · ч энергии 1 : 4,55 (при 100%-м переходе электроэнергии в тепловую).

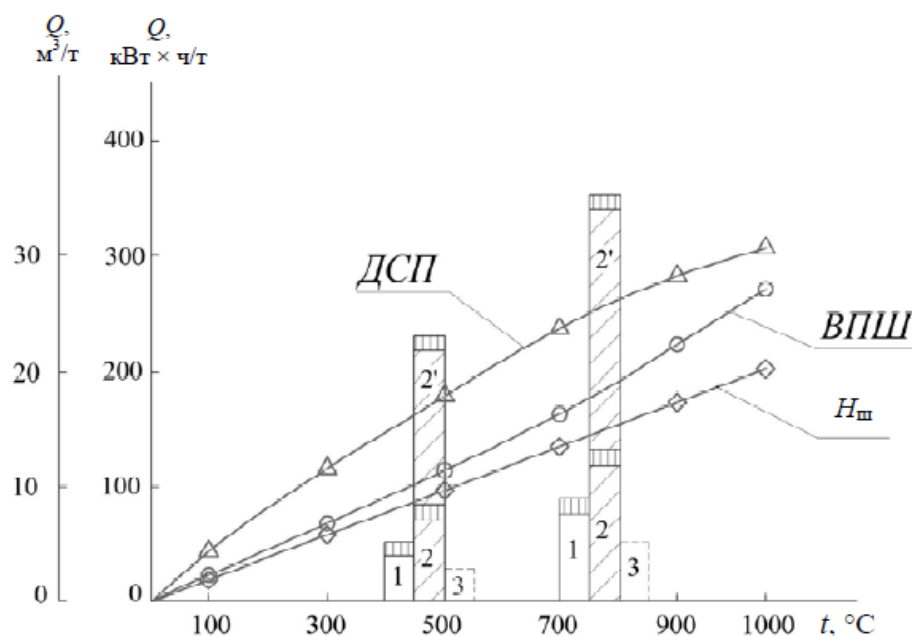


Рис. 2. Затраты энергосносителей на нагрев шихты: 1) в натуральном выражении: ВПШ – природного газа в установках высокотемпературного подогрева шихты в бадьях; ДСП – электроэнергии в дуговых печах; $H_{ш}$ – энтальпия шихты (энергия, накопленная шихтой); 2) в стоимостном выражении: 1 – затраты на природный газ; 2 – затраты на электроэнергию, при соотношении стоимости «природный газ/электроэнергия» – 1/1; 2' – затраты на электроэнергию при соотношении 1/3; 3 – приведенные энергозатраты при использовании отходящих газов

Для полной оценки экономического эффекта необходимо, конечно, учитывать и сокращение времени плавки (до 30 % периода расплавления шихты), расхода электродов (стоимость электродов диаметром 600 мм ~ 47400 р./кг), кислорода (~ 1920 р./м³) и футеровки. В ряде работ выделяется в качестве основной составляющей экономического эффекта снижение себестоимости шихты за счет увеличения доли низкокачественного скрапа пропорционально температуре предварительного подогрева [3], [4].

Еще более привлекательным выглядит способ подогрева шихты за счет вторичных энергоресурсов электродуговой плавки, которыми в данном случае могут служить отходящие из ЭДП газы (рис. 2).

В соответствии с тепловым балансом современных печей (лучший вариант) при суммарном расходе тепла 640–660 кВт · ч/т, из которого на долю электроэнергии приходится 340–360 кВт · ч/т, а остальное – тепло от экзотермических реакций, сжигания дополнительного топлива и угара электродов, потери тепла с отходящими газами составляют 143–205 кВт · ч/т (22–32 %). Этого тепла достаточно для нагрева скрапа до 700 °С и более. Если учесть, что в литейных цехах, где используются печи небольшой мощности (3–20 т/ч), удельные затраты электроэнергии достигают 700–750 кВт · ч/т, потери тепла с отходящими газами достигают 400–440 кВт · ч/т, соответственно, резерв тепловой энергии для использования в ВПШ становится еще больше [5].

Конечно, соотношение стоимости тепловой энергии, полученной от различных энергоносителей в разных странах, различное. В США соотношение газ – электроэнергия равно примерно 1 : 6, Украине 1 : 2, в РФ в зависимости от региона – от 1 : 5 до 1 : 12. Эти соотношения меняются также от года к году, что определяется многими зачастую даже не экономическими факторами, а конъюнктурой. Однако нетрудно подсчитать, что при соотношении 1 : 3 достаточно обеспечить КПД установки ВПШ на уровне ~ 25 %, чтобы получить уже значимый экономический эффект за счет сокращения расхода электроэнергии в ЭДП, электродов, футеровки, эксплуатационных расходов и повышения производительности печей.

Оптимально спроектированные установки обеспечивают средний за период нагрева КПД > (70–75) %, что гарантирует их быструю окупаемость даже при соотношении цен 1 : 2.

Эти критерии пригодны для оценки применимости предварительного нагрева шихты для любых типов электропечей. Если учесть, что тигельные индукционные печи промышленной частоты (ИЧТ) имеют КПД на этапе нагрева шихты 30–35 %, средней частоты ~ 50–60 %, дуговые ДЧМ ~ 45–50 %, ДППТ ~ 55–65 % и т. д. [6], то перспективность предварительного подогрева шихты очевидна.

Исходя из приведенных данных, следует вывод о том, что чем выше температура подогрева шихты, тем выше получаемый эффект энергосбережения и, соответственно, экономический.

Однако ряд специалистов с осторожностью относятся к данному положению и считают, что оптимальная температура нагрева располагается в диапазоне 450–480 °С, а сама зависимость экономического эффекта от температуры носит экстремальный характер, что графически представлено на часто цитируемом графике [7]. Соответствующее уравнение регрессии для удельной экономии электроэнергии представлено в работе [8] следующим выражением: $\mathcal{E} = -0,0012T^2 - 1,096T - 161,6$ (кВт · ч/т). Эта зависимость объясняется потерями тепла на восстановление оксидов, которые образовались при ВПШ.

С нашей точки зрения, какие-либо дополнительные потери не достигают сколь-либо значимой величины, если рассматривать процесс в комплексе: ВПШ – ЭДП. Известно, что угар металла в дуговых печах, особенно в зоне дуги и при использовании тонколи-

стового скрапа (плотность шихты $\rho < 2$) достигает 6–7 % и более, в отдельных плавках – 10 %). Практика показала, что суммарный угар в системе «ВПШ – ЭДП» существенно ниже: не более 4–5 %. Это объясняется тем, что в ВПШ нагрев ведется с большей скоростью и реакции окисления при $t > 550\text{--}600$ °С не могут достичь равновесия. Кроме того, образующаяся пленка оксидов достаточно плотная и препятствует диффузии кислорода. Угар при ВПШ не превышает, как правило, 0,5 %. В то же время стадия активного окисления в ЭДП сокращается на 25–30 %. Этим, в частности, объясняется возможность увеличения доли в шихте низкосортного тонколистового скрапа при использовании предварительного подогрева [3], [9].

Установки и системы подогрева шихты

Энергетический кризис 80-х гг. и постоянный рост стоимости энергоресурсов вызвали необходимость обратить особое внимание на ВПШ как действенное средство ресурсосбережения.

Интенсивные исследовательские и конструкторские работы по сокращению удельных затрат электроэнергии при плавке привели к созданию различных систем подогрева шихты, которые можно объединить в следующие группы (с указанием фирм-разработчиков) [4], [10]–[12]:

- системы подогрева шихты в бадьях – Bucket Scrap Preheating Systems (Daido, NKK, Krupp, SMS-Demag, Siemens-VAI, Danarc, Danieli);
- вращающиеся нагревательные печи – Rotary Kiln Preheater (Fuel Arc Furnace, BBS-Brusa);
- шахтные печи – с одной или двояной шахтой с удерживающими пальцами – Shaft Furnaces – Single, Double and Finger Shafts (Siemens-VAI);
- шахтодуговые печи – EcoArc Shaft Furnace (NKK);
- шахтные печи с толкателями – Shaft Furnace with pusher (ИИ);
- шахтно-дуговые с перемещаемым подогревателем – COSS (Continuous Optimized Shaft System) Shaft Furnace (Fuchs);
- подогреватели непрерывного действия (подогрев шихты на конвейере) – Continuous Scrap Preheating System (Tenova Consteel Process, Danieli ESC System);
- двоянные (двухкорпусные) печи – Twin Shell Furnace;
- бадьевые высококорпусные печи – Single Bucket High Shell Furnace.

Можно заметить, что в металлургии усилия были направлены в основном на создание комбинированных комплексных агрегатов, включающих помимо собственно ДСП сопряженную с ней установку, в которой за счет тепла отходящих газов подогревается шихта до максимально возможных температур.

Наиболее удачной по компактности, технологичности и эффективности зарекомендовала себя последняя разработка фирмы «Fuchs Systemtechnik AG»: дуговая печь с устройством для подогрева шихты «COSS» и боковой загрузкой (рис. 4). Шихта загружается в «COSS», где нагревается до 650–850 °С печными газами, поступающими с температурой 750–1600 °С. Загрузка горячей шихты в печи осуществляется 5–6 раз в час порциями примерно по 20 т. Фактически процесс плавки идет непрерывно с периодическими выпусками жидкого металла по 100–120 т [10].

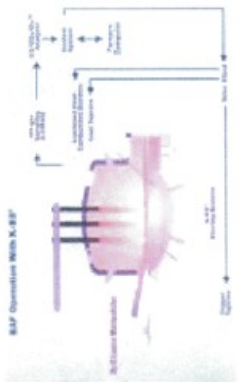
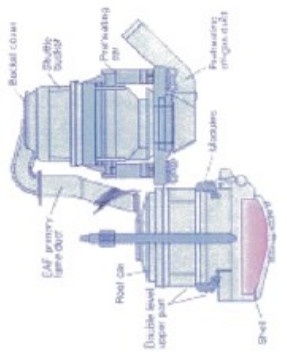

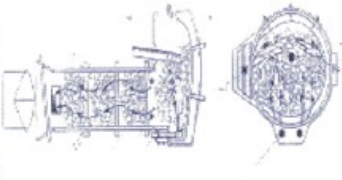
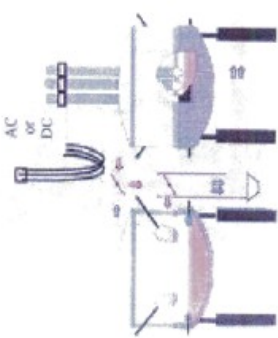

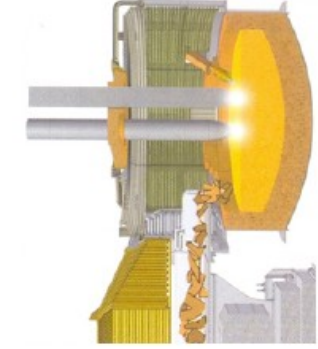
<p>KES [Klockner Electric Steel process]</p>		<p>DANARC [DANIeli electric ARC]</p>		<p>CONARC [CONverter – ARC furnace]</p>		<p>FAF [Fuel Arc Furnace]</p>	
		<p>Consteel</p>				<p>Shaft Furnace</p>	
				<p>TWIN</p> 		 <p>FSF (finger Shaft Furnace)</p>	

Рис. 3. Комбинированные электроплавильные установки (ЭДП-ВПШ)

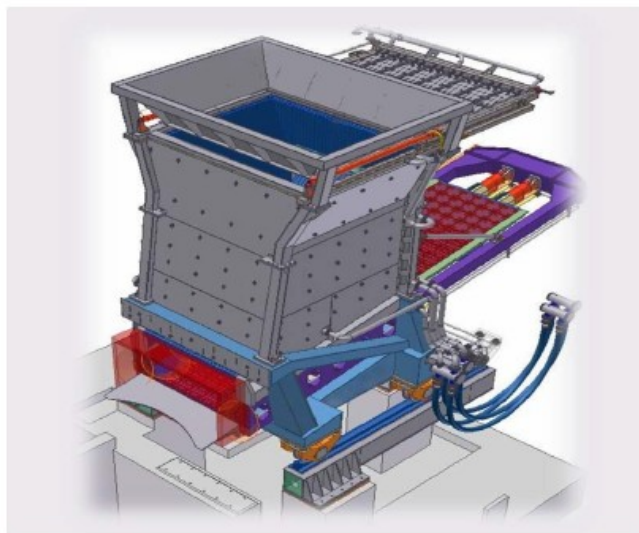


Рис. 4. Шахта «COSS» для подогрева и порционной загрузки шихты

При минимальном расходе электродов 1,3 кг/т и вдувании углеродосодержащих материалов в пределах 12,6–13,5 кг/т расход электроэнергии составляет около 260 кВт · ч/т при выплавке углеродистой стали.

Нагрев шихты в слое за счет продувки его газами является наиболее эффективным способом теплопередачи, что, в частности, объясняет компактность и высокий КПД установок, работа которых основана на этом принципе: установки ВПШ в завалочных бадьях, установки шахтного типа, в том числе COSS, и др.

При этом наиболее простыми и надежными в обслуживании и эксплуатации являются автономные установки с газовым подогревом шихты. Наиболее экономичными, но существенно более сложными и дорогими являются установки подогрева шихты, использующие тепло дымовых газов (ВЭР). Использование ВЭР вызывает проблемы, связанные с синхронизацией работы печи и установки подогрева, а также необходимостью проведения дополнительных мероприятий, направленных на повышение стабильности и эффективности работы системы пылегазоочистки. Последнее особенно актуально при использовании загрязненной низкосортной шихты, что, к сожалению, становится все более распространенным явлением.

В слое нагреваемой шихты газы, отходящие из ДСП, дополнительно насыщаются продуктами испарения и деструкции органических соединений, аэрозолями и частицами синтетических материалов (масла, краски, пластмасса и т. п.). Высокодисперсные органические вещества и сажистый углерод, осаждаясь на фильтрах и накапливаясь в слое уловленной аспирационной пыли, способны к интенсивному окислению и разогреву, что может привести к возгоранию в газоходах и тканевых фильтрах.

Эта проблема характерна для всех подобных систем, работающих на печных газах, и имеет общее решение: дожигание газов на выходе из слоя шихтовых материалов с последующим охлаждением и/или разбавлением перед входом в фильтр. Одним из вариантов такого решения является поджигание дымовых газов на выходе из слоя шихты за счет подвода горячих газов с температурой выше 750 °С непосредственно из рабочего пространства печи (минуя шахту или COSS), в количестве 0,1–0,3 от общего объема отходящих газов. Более простым и надежным решением является установка горелок – запальников, работающих на природном газе. Естественно в камеру дожигания должен подаваться воздух для горения СО и органических примесей в стехиометрических соотношениях.

В установках ВПШ, где нагрев осуществляется отходящими газами, проходящими по тоннелям (камерам) над шихтой («Consteel» и др.), дожигание СО и органики осуществляется непосредственно по тракту движения шихты в свободном пространстве над ее поверхностью. Выделяющееся тепло служит дополнительным источником энергии. Подобные установки обеспечивают высокую температуру нагрева, но имеют большие габариты (протяженность), значительные тепловые потери и, соответственно, более низкий, чем шахтные печи, КПД [11], [12].

На рис. 3 представлены некоторые из известных установок комбинированного типа, освоенных в последние годы рядом металлургических фирм. Нетрудно заметить, что эти установки отличаются от традиционных ДСП значительно большими габаритами, более сложными устройствами загрузки шихты, более «жестким» технологическим режимом, что требует и более сложной системы контроля и управления. Важным фактором является также колебание температуры и состава газов на выходе из ДСП по ходу плавки, и, соответственно, переменные условия нагрева шихты и возможности дожигания СО и органики. Существенно меняется организация завалки, что требует или увеличения высоты уровня загрузки шихты (в установках шахтного типа), или протяженности загрузочных конвейеров (в установках типа «Consteel»).

Во вновь строящихся цехах это не вызывает особых сложностей, но при реконструкции действующих цехов и замене традиционных агрегатов это требует тщательной проектной проработки, дополнительных капложений, а зачастую вообще невозможно.

Подогрев шихты в загрузочных бадьях

Альтернативой, особенно для действующих производств, является подогрев шихты в бадьях. При этом могут рассматриваться варианты нагрева как за счет тепла отходящих газов, так и за счет использования дополнительного топлива – преимущественно природного газа [13].

Кажущаяся простота решения задачи экономии электроэнергии и утилизации ВЭР с минимальными капзатратами при подогреве шихты непосредственно в загрузочных бадьях стимулировала активную разработку таких систем во второй половине прошлого века. Уже в 50-х гг. несколько фирм в Японии и Европе начали использование установок предварительного подогрева шихты в бадьях. За 70–80-е гг. только в Японии было создано более 50 таких установок.

На рис. 5 представлена одна из установок такого типа фирмы Washington Steel Corp., Houston (США) [3].

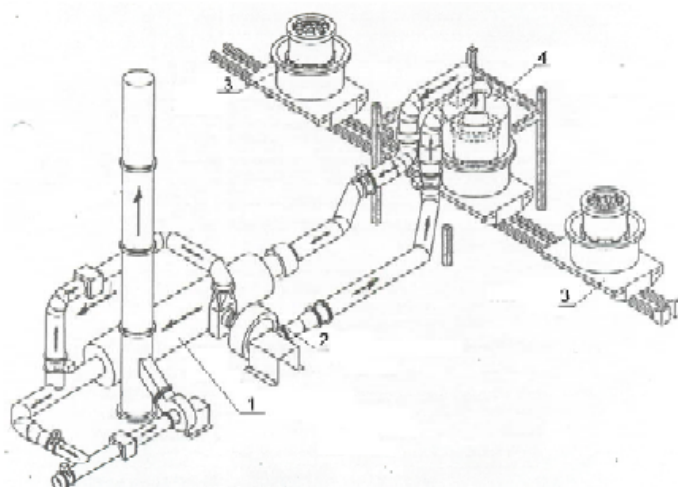


Рис. 5. Схема установки Washington Steel Corp. для подогрева шихты в загрузочной бадье:
1 – рекуператор; 2 – вентилятор; 3 – позиции ожидания; 4 – камера подогрева

Отходящие из ДСП газы проходят через слой шихты в бадье, откуда направляются в камеру дожигания – рекуператор, после чего разделяются на два потока: часть выбрасывается в атмосферу, часть снова направляется в бадью. Сама бадья находится в камере с теплоизолированными стенками (рис. 6).

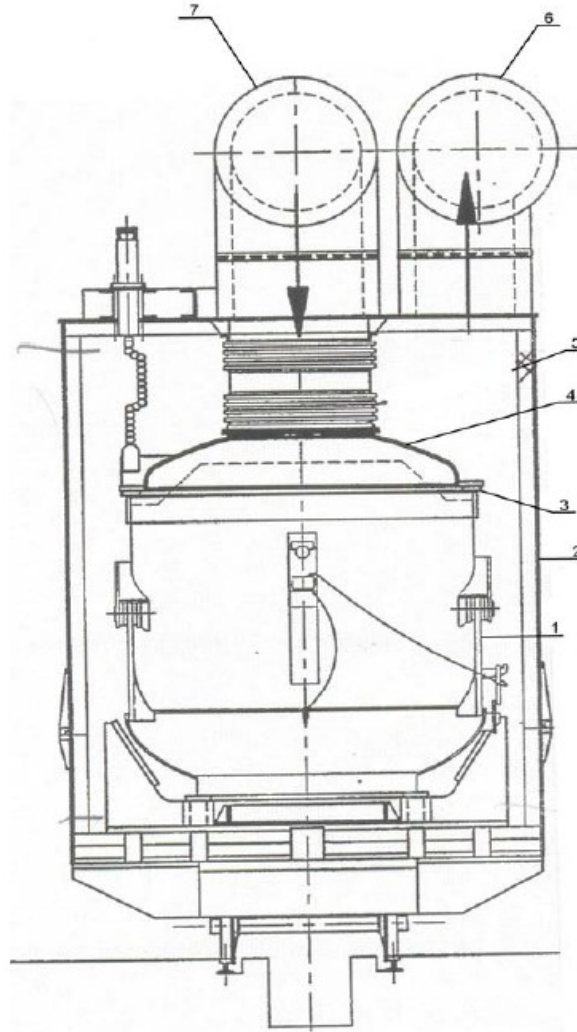


Рис. 6. Бадья в теплоизолированном корпусе камеры подогрева:
 1 – бадья с шихтой; 2 – корпус камеры подогрева; 3 – затвор; 4 – свод-крышка;
 5 – теплоизоляция; 6 – отвод дымовых газов; 7 – ввод дымовых газов в бадью

Интересно, что подобное (и как будет ниже показано, ошибочное) конструктивное решение было использовано в целом ряде подобных установок. Достаточно привести пример установки (рис. 7), которую в свое время пытались применить на Минском тракторном заводе, с той лишь разницей, что на РУП «МТЗ» нагрев осуществлялся за счет сжигания природного газа.

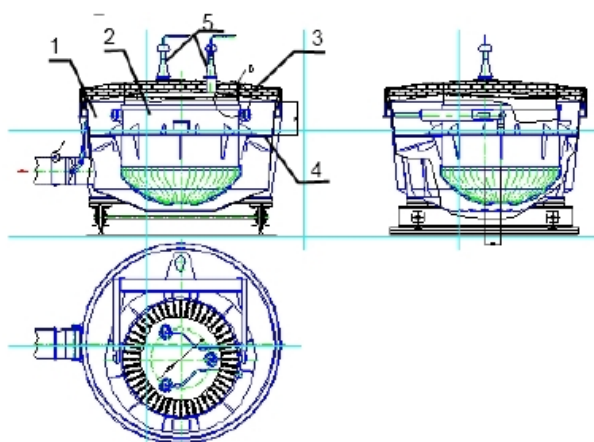


Рис. 7. Первоначальный вариант установки подогрева шихты на РУП «МТЗ»: 1 – корпус; 2 – бадья; 3 – свод; 4 – опорное кольцо; 5 – инжекционные горелки

Сложная система с двумя ступенями нагрева бадей, выполненных из жаростойкой стали, двумя вентиляторами, разделением потоков и циркуляцией газов, в некоторой степени напоминающая установки Washington Steel Corp., была использована на установках подогрева шихты для 30-тонных индукционных печей на Заводе литья и нормалей (г. Гомель), выполненных по проекту института ГИПРОТСХМ (г. Харьков). После доработки этой системы специалистами ГГТУ им. П. О. Сухого, в частности, перевода ее в режим «под разряжением», ликвидации перегородок (встречных потоков газов) и оснащения ее аппаратами очистки, она была введена в эксплуатацию и работает по настоящее время (рис. 8) [14]. Можно отметить, что корпус бадьи здесь не изолирован от окружающей среды.

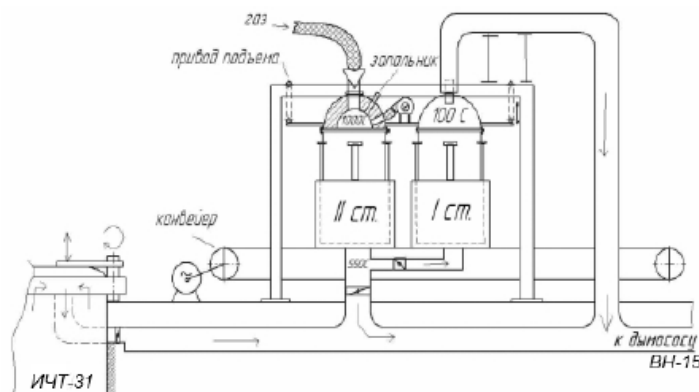


Рис. 8. Схема двухступенчатой системы подогрева шихты в бадьях (ЗЛН, г. Гомель)

Однако нагрев в загрузочных бадьях имеет наряду с привлекательной простотой очевидный недостаток: невозможно нагреть шихту, не нагревая в то же время корпус бадьи. Причем температура нагрева самой бадьи в представленных выше установках выше, чем шихты. Сопротивление вдоль корпуса бадьи для потока газов меньше, чем сквозь слой шихты в центральной части слоя, соответственно, больше скорость и конвективный теплообмен.

Нагревать бадью – грузонесущее оборудование выше 350 °С опасно. Отсюда ограничение по температуре нагрева шихты и недостаточная эффективность представленных выше схем подогрева.

С другой стороны, при температурах около 250–350 °С практически осуществляется лишь сушка и частичная очистка (продувка) шихты, что является положительным фактором, повышающим безопасность плавки, особенно в холодное время года, так как предотвращает выбросы из плавильной печи из-за попаданий влаги и льда с шихтой. Именно такую задачу решают подобные установки на ряде заводов (рис. 9). Однако о заметном экономическом эффекте при этом говорить не приходится.

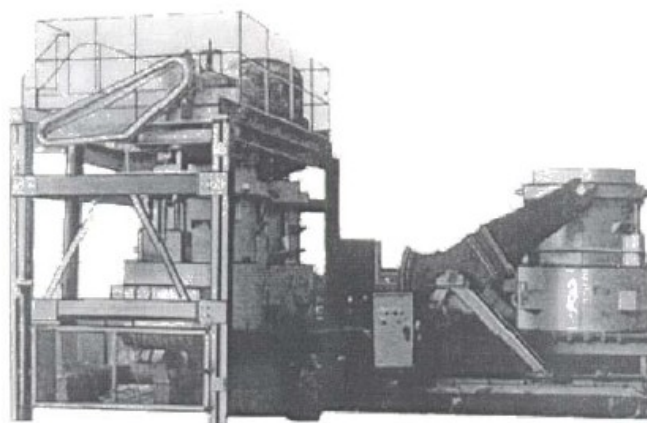


Рис. 9. Установка сушки шихты

Экономия электроэнергии в 35–45 кВт · ч/т является недостаточным стимулом для дополнительных затрат на эксплуатацию и обслуживание таких установок. Попытки улучшить процесс за счет применения бадей из жаропрочной стали, футеровка бадей и т. п. не привели к существенному повышению эффективности, но вызвали значительное удорожание установок и снижение рентабельности.

Использование для подогрева шихты в бадьях отходящих печных газов создает дополнительные трудности из-за нестабильности режимов работы печи, колебаний температуры и расходов газов (рис. 10). На входе в бадью параметры газового потока необходимо стабилизировать по температуре во избежание перегрева и коробления корпуса, а при понижении температуры отходящих газов включать газовые горелки для интенсификации подогрева шихты

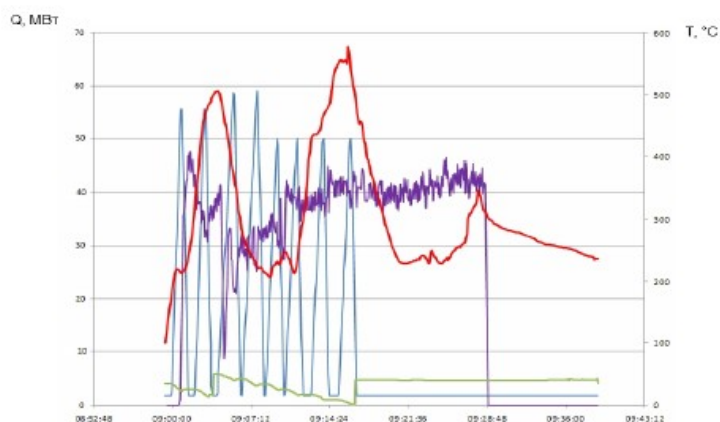


Рис. 10. Изменения температурного режима по ходу плавки (координаты: потребляемая мощность – время):

1 – загрузка очередной порции 20 т; 2 – потребляемая мощность; 3 – температура отходящих газов; 4 – масса шихты в шахте подогревателя

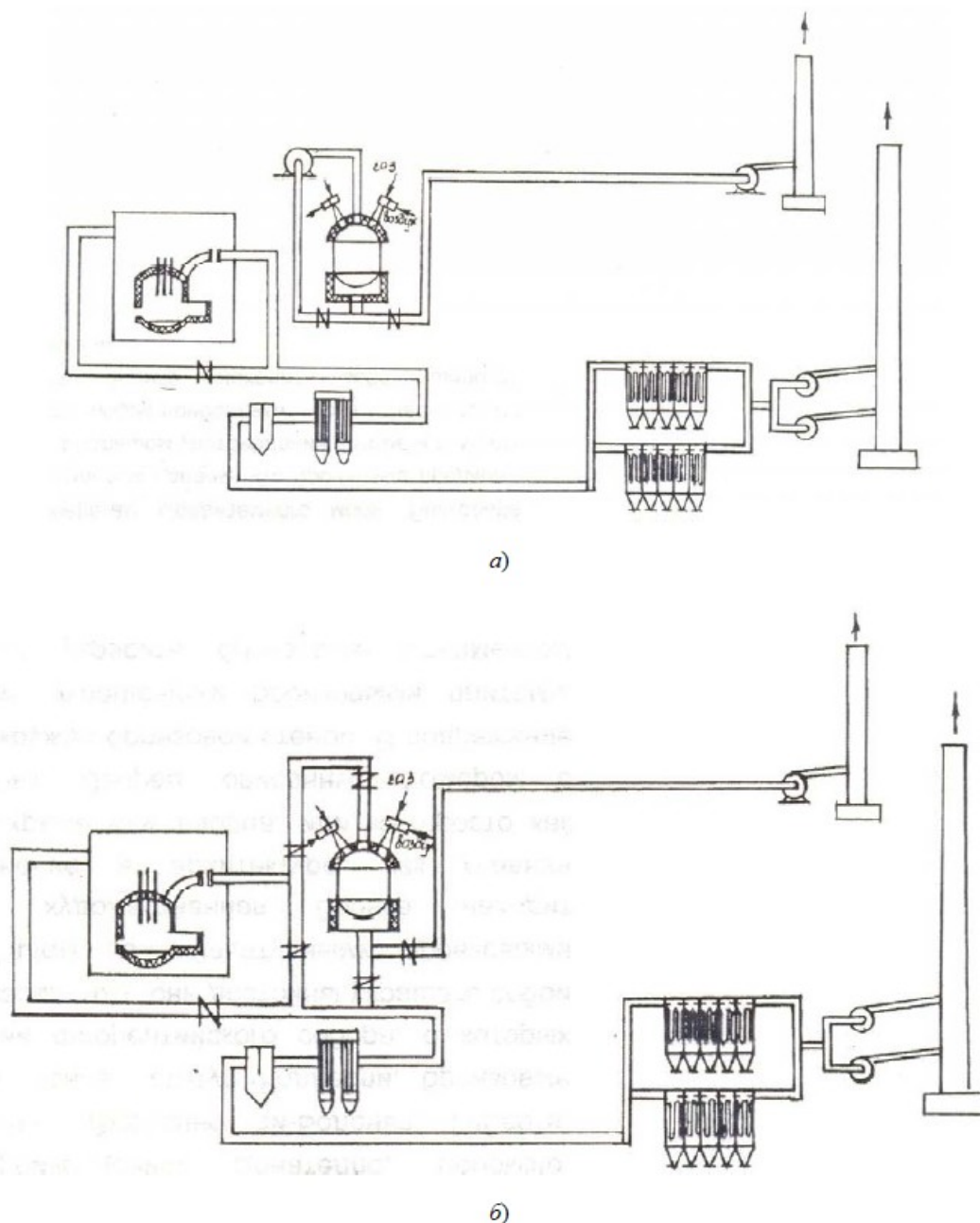


Рис. 11. Системы подогрева шихты в бадах:
 а – автономная; б – за счет тепла отходящих печных газов

Значительно усложняется система аспирации и очистки отходящих газов (рис. 11).

Все это привело к тому, что способ подогрева шихты в бадах в 90-е гг. в значительной степени утратил в глазах металлургов свою привлекательность.

В начале 2000-х гг. сотрудниками ГГТУ им. П. О. Сухого и УП «Технолит» после достаточно длительных поисковых работ было найдено простое решение, позволяющее осуществить высокотемпературный подогрев шихты в малозатратной установке, легко адаптирующейся к действующему плавильному оборудованию.

Сущность технического решения заключается в применении специальной «бадь-термоса» [14]. При этом изготовить такую бадью можно простой доработкой tradi-

ционных загрузочных бадей (корзин). Для этого в обычную загрузочную бадью (корзину) из конструкционной стали концентрически устанавливается вставка. Эта вставка позволяет разделить функции, выполняемые бадьей: грузонесущую – выполняет корпус, а роль ограждающей тепловой стенки (экрана) играет вставка, не испытывающая серьезных механических нагрузок. Установки ВПШ на основе «бадьи-термоса» успешно внедрены в Республике Беларусь и Украине, обеспечив нагрев шихты до 650–750 °С. При оптимальной конструкции ее эффективность соответствует лучшим вариантам современных комбинированных установок ЭДП–ВПШ.

Заключение

Высокотемпературный предварительный подогрев шихты при электроплавке является эффективным средством интенсификации плавки, сокращения затрат электроэнергии и материалов, повышения безопасности и улучшения экономических и экологических параметров плавки.

При этом можно выделить два наиболее перспективных направления. Во вновь строящихся цехах предпочтительнее использовать электродуговые печи с встроенными боковыми установками шахтного типа (ЭДП–ВПШ), обеспечивающими нагрев шихты до 700–800 °С и снижение удельных затрат электроэнергии до 260–280 кВт·ч/т. При доработке систем обезвреживания эти агрегаты могут служить хорошей альтернативой современным ДСП.

Оптимальным решением для действующих цехов может служить автономный подогрев шихты в бадьях нового типа, обеспечивающих высокотемпературный нагрев шихты.

Внедрение установок ВПШ в литейном производстве и металлургии является перспективным средством ресурсосбережения при плавке черных и цветных металлов.

Литература

1. Найдек, В. Л. Интенсификация электроплавильных процессов / В. Л. Найдек, А. А. Костяков, А. А. Волошин // *Соврем. электрометаллургия*. – 2009. – № 2.
2. Ткаченко, С. С. Проблемы модернизации литейного производства станкостроения / С. С. Ткаченко, В. С. Кривицкий // *Литейное пр-во*. – 2012. – № 5.
3. *Technoeconomic Assessment of Electricity Steelmaking Through the Year 2000*. EPRI Report. EM-5445.
4. Fontana, A. EAF Scrap Preheating Technologies. – Victoria, Australia / *High Temp. Pr. Symposium*, 2012.
5. Смирнова, Е. Ю. Использование тепла отходящих газов ДСП для подогрева шихты // Е. Ю. Смирнова // *Электрометаллургия*. – 2003. – № 10.
6. Пути снижения расхода энергетических ресурсов в литейном производстве. – М.: Металлург, 2001.
7. Супрун, В. Н. Подогрев лома / В. Н. Супрун // *Рынок вторичных материалов*. – 2003. – № 3.
8. Стеблов, А. Б. Пути снижения затрат при выплавке стали // А. Б. Стеблов, А. В. Мажейко, Э. А. Стеблова // *Металлург*. – 2006. – № 11.
9. Schmitt, R. Y. *Electric Arc Furnace Scrap Preheating*. CMP, Pittsburgh, 1997.
10. Шахтно-дуговые печи / Г. Фукс [и др.] // *Электрометаллургия*. – 2000. – № 8.
11. Райле, В. Т. Совершенствование работы шахтных подогревателей второго поколения / В. Т. Райле, В. Е. Рошин // *Вестн. ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2010. – Вып. 14. – № 13.

12. K. Rummel, A. Tunaboyl, Scrap Preheating and Continuous Charging System. MPT Int. – 2011. – № 5.
13. Лопухин, Г. А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства / Г. А. Лопухин // Электromеталлургия. – 2000. – № 7.
14. Установки подогрева шихты для электроплавки / С. Л. Ровин [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – № 2.

Получено 04.10.2013 г.