



УДК 621.74

Поступила 22.07.2013

Л. Е. РОВИН, ГТТУ им. П. О. Сухого, С. Л. РОВИН, УП «Технолит»

СОКРАЩЕНИЕ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ПЛАВКЕ ЧУГУНА И СТАЛИ

Показано, что внедрение установки высокотемпературного подогрева шихты обеспечивает повышение безопасности плавки, устойчивости работы дуги, снижение уровня шума до 75–85 дБ, устранение неорганизованных выбросов вредных веществ в рабочую зону.

It is shown that the introduction of high-temperature heating installation charge fusion provides increased security, stability of operation arc, reduced noise to 75–85 dB, the elimination of fugitive emissions in the work zone

Интенсификация технологических процессов – наиболее эффективное 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 некоторые из наиболее значимых мероприятий, внедрение которых привело 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 возможному 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 к.п.д. 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 элект-

роэнергии на плавку дает ориентировочно следующее соотношение (при общих затратах ~650–680 кВт·ч/т): дожигание СО непосредственно в рабочем пространстве путем дополнительной

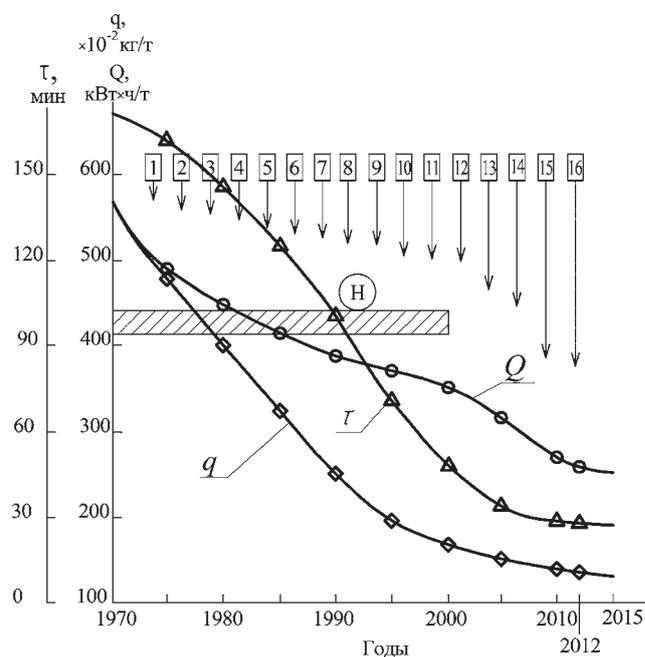


Рис. 1. Влияние методов интенсификации на основные технико-экономические параметры выплавки стали в электродуговых печах: τ – продолжительность плавки; q – удельный расход электродов; Q – удельный расход электроэнергии; H – суммарная энтальпия жидких стали и шлака, кВт; 1–16 – методы интенсификации соответственно: 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 (ВПШ), комплексные плавильные агрегаты с непрерывным подогревом шихты

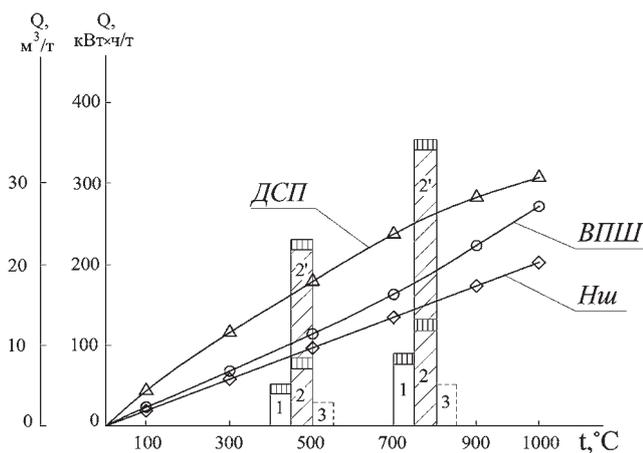


Рис. 2. Затраты энергоносителей на нагрев шихты: в натуральном выражении: ВПШ – природного газа в установках высокотемпературного подогрева шихты в бадьях; ДСП – электроэнергии в дуговых печах; Н – энтальпия шихты (энергия, накопленная шихтой); в стоимостном выражении: 1 – затраты на природный газ; 2 – 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

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 углеродсодержащего компонента) – 10%, использование в завалке жидкого чугуна – 10%, использование топливо-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 °C в окислительной среде или свариванием кусков скрапа при температурах выше 900–1000 °C.

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 (к.п.д.).

Термический к.п.д. ЭДП равен примерно $\eta \approx 0,6$, изменяясь по ходу плавки от 0,4 при нагреве шихты до 0,8 при нагреве жидкой ванны. К.п.д. 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 руб. (в ценах 2012 г. для промышленных предприятий), а такое же количество тепловой энергии, полученной от сжигания природного газа, около 250 руб., что дает соотношение затрат на получение 1 кВт·ч энергии 1:4,55 (при 100%-ном переходе электроэнергии в тепловую).

Для полной оценки экономического эффекта необходимо, конечно, учитывать и сокращение времени плавки (до 30% периода расплавления шихты), расхода электродов (стоимость электродов диаметром 600 мм ~47 400 руб./кг), кислорода (~1920 руб./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 [4–6].

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 300 °C 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 – 400–440 кВт·ч/т, соответственно резерв тепловой энер-

гии для использования в ВПШ становится еще больше [3].

Конечно, соотношение стоимости тепловой энергии, полученной от разных 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 из года в год, что определяется многими зачастую даже не экономическими факторами, а конъюнктурой. Однако нетрудно подсчитать, что при соотношении 1:3 достаточно обеспечить к. п. д. 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 к.п.д. > 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 к. п. д. на этапе нагрева шихты 30–35%, средней частоты ~50–60, дуговые ДЧМ ~45–50, ДППТ ~55–65% и т. д. [8], то перспективность предварительного подогрева шихты очевидна.

Исходя из приведенных данных, следует, 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 в работе [9]. Соответствующее уравнение регрессии для удельной экономии электроэнергии в работе [10] имеет вид: $\Delta = -0,0012T^2 - 1,096T - 161,6$ (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 значимой величины, если рассматривать процесс в комплексе: ВПШ – ЭДП. Известно, что угар металла в дуговых печах, особенно в зоне дуги и при использовании тонколистового 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 $t > 550–600$ °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 низко-сортного тонколистового скрапа при использовании предварительного подогрева [7,11].

Энергетический кризис 80-х годов и постоянный рост стоимости энергоресурсов вызвали необходимость обратить серьезное 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) [12–15]:

- 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 сдвоенной шахтой с удерживающими пальцами – Shaft Furnaces – Single, Double and Finger Shafts (Siemens-VAI).
- Шахтнодуговые печи – EcoArc Shaft Furnace (NKK).
- Шахтные печи с толкателями – Shaft Furnace with pusher (INI).
- Шахтнодуговые печи 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).
- Сдвоенные (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

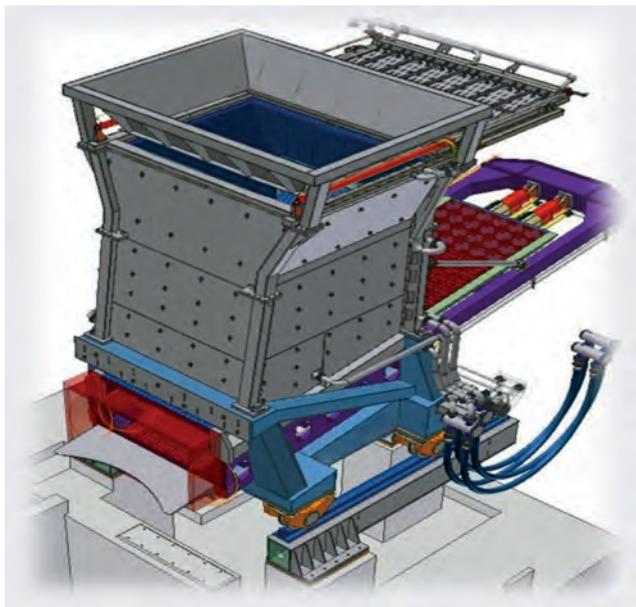


Рис. 3. Шахта COSS для подогрева и порционной загрузки шихты

AG: дуговая печь с устройством для подогрева шихты COSS и боковой загрузкой (рис. 3). 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 [14].

При минимальном расходе электродов 1,3 кг/т и вдувании углеродсодержащих 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 к. п. д. установок, работа которых основана на этом принципе: установки ВПШ в завалочных бадах, установки шахтного типа, в том числе COSS и др.

При этом наиболее простые и надежные в обслуживании и эксплуатации – 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 частичками 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 к.п.д. [15].

На рис. 4 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 воз-

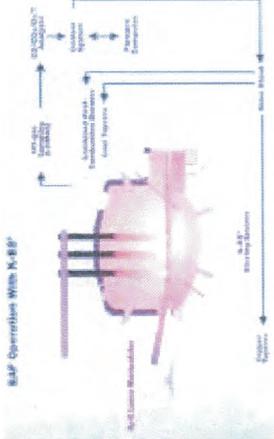
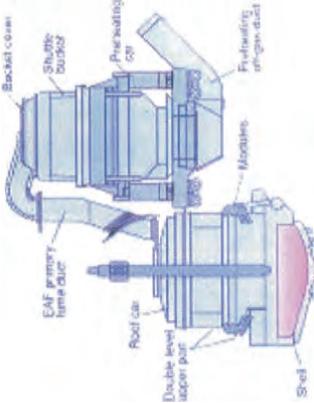
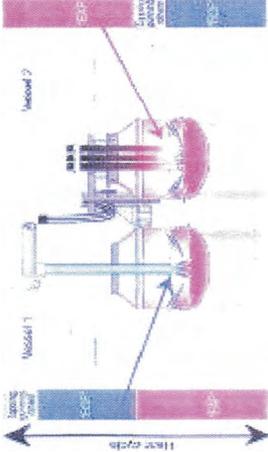
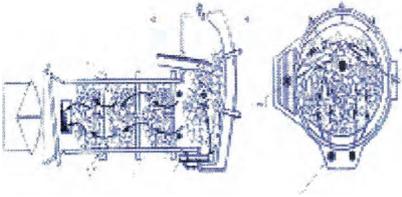
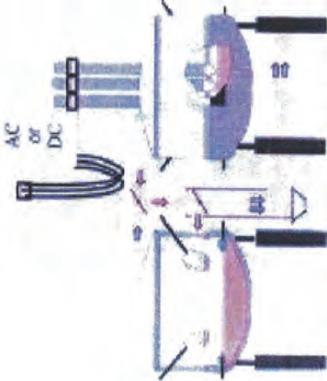
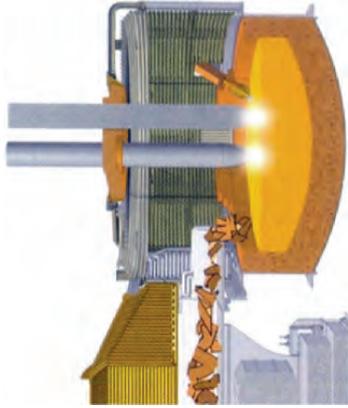
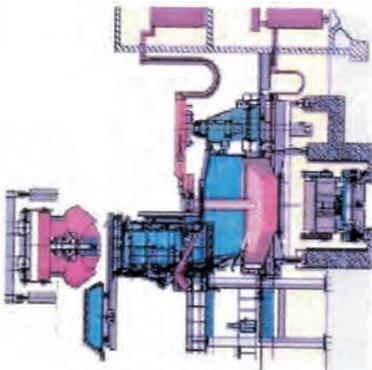
<p>KES [Klockner Electric Steel process]</p> 	<p>DANARC [DANIELI electric ARC]</p> 	<p>CONARC [CONVERTER – ARC furnace]</p> 	<p>FAF [Fuel Arc Furnace]</p> 
<p>TWIN</p> 	<p>Consteel</p> 	<p>Shaft Furnace</p> 	<p>FSF (finger Shaft furnace)</p> 

Рис. 4. Комбинированные электродуговые установки

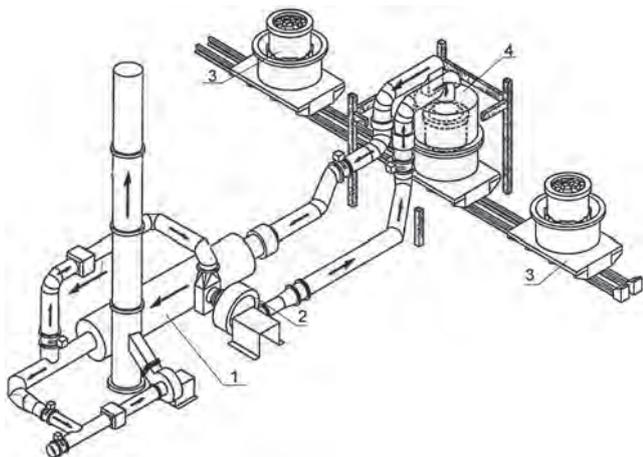


Рис. 5. Схема установки Washington Steel Corp. для подогрева шихты в загрузочной бадье: 1 –рекуператор; 2 – вентилятор; 3 – позиции ожидания; 4 – камера подогрева

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 капитальных вложений, а зачастую вообще невозможно.

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.

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

На рис. 5 показана одна из установок такого типа фирмы Washington Steel Corp., Houston (США) [11].

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).

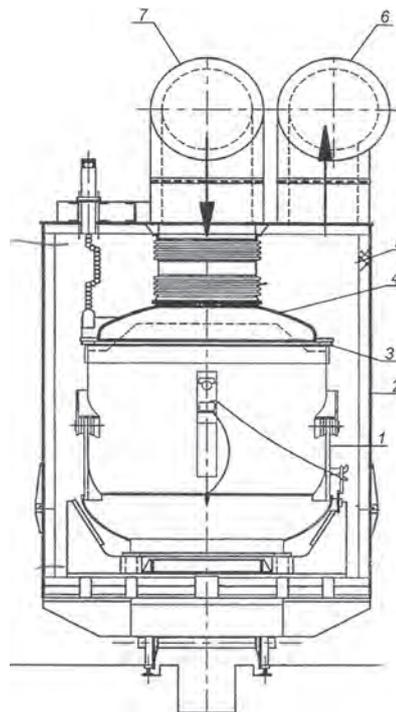


Рис. 6. Бадья в теплоизолированном корпусе камеры подогрева: 1 – бадья с шихтой; 2 – корпус камеры подогрева; 3 – затвор; 4 – свод-крышка; 5 – теплоизоляция; 6 – отвод дымовых газов; 7 – ввод дымовых газов в бадью

Интересно, что подобное (и, как будет ниже показано, ошибочное) конструктивное решение было использовано в целом ряде подобных установок.

На некоторых заводах делались попытки реализовать такую схему нагрева шихты, используя резервные или выведенные из строя дуговые печи путем установки вместо сводовых электродов газовых горелок (рис. 7).

Сложная система с двумя ступенями нагрева, двумя вентиляторами, разделением потоков и циркуляцией газов, в некоторой степени напоминаю-

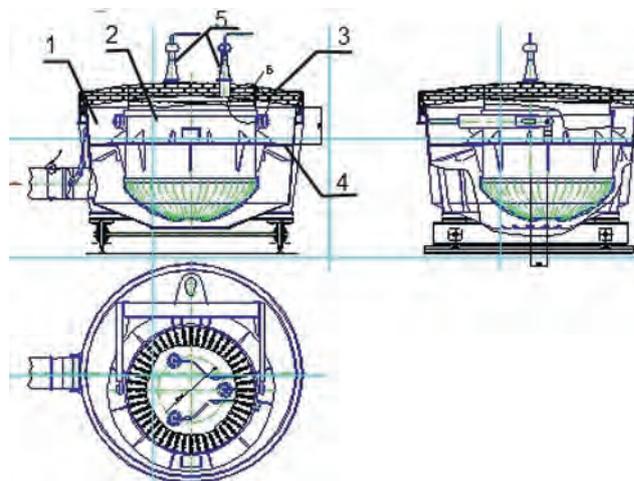


Рис. 7. Подогрев шихты в бадье, помещенной в корпус дуговой печи: 1 – корпус; 2 – бадья; 3 – свод; 4 – опорное кольцо; 5 – инжекционные горелки

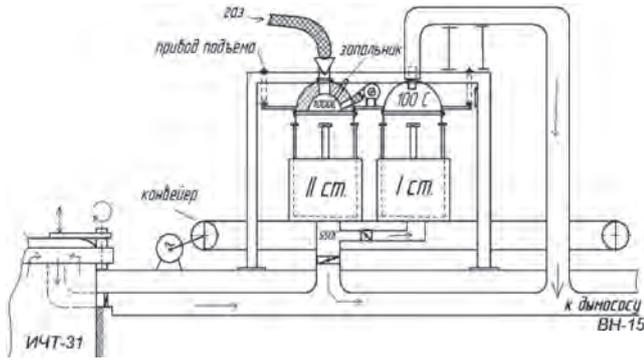


Рис. 8. Схема двухступенчатой системы подогрева шихты в бадах (ГП «ГЗЛиН», г. Гомель)

шая установки Washington Steel Corp., была использована на установках подогрева шихты для 30-тонных индукционных печей на ГП «ГЗЛиН» (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 перетоков (встречных потоков газов) и оснащения ее аппаратами очистки она была введена в эксплуатацию и работает по настоящее время (рис. 8) [17].

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

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

С другой стороны, при температурах порядка 250–350 °С практически осуществляется лишь сушка и частичная очистка (продувка) шихты, что конечно, 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.

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, футе-

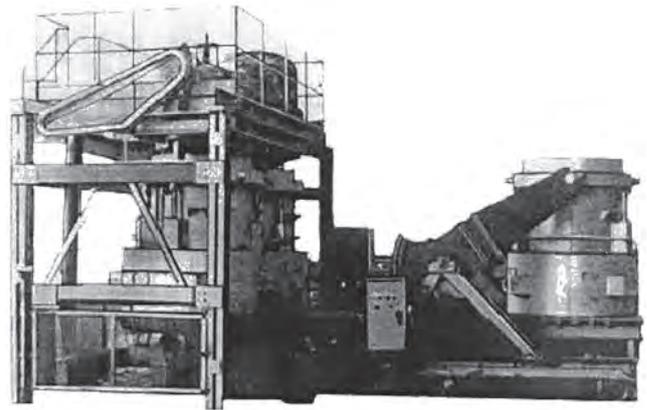


Рис. 9. Установка сушки шихты

ровка бадей и т. п. не привели к существенному повышению эффективности, но вызвали значительное удорожание установок и снижение рентабельности.

Использование для подогрева шихты в бадах отходящих печных газов создает дополнительные трудности из-за нестабильности режимов работы печи, колебаний температуры и расходов газов (рис. 10). На входе в бадю 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.

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

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

В начале 2000-х годов сотрудниками ГГТУ им. П. О. Сухого (г. Гомель) и УП «Технолит» (г. Минск) 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 бады-термоса [18]. При этом получить такую бадю можно простой доработкой традиционных грузочных бадей. Для этого в обычную грузочную бадю (корзину) из конструкционной стали концентрически устанавливается вставка: обечайка из такого же «черного» металла толщиной 6–10 мм с зазором между ней и корпусом бады 50–100 мм. Эта вставка позволяет разделить функции, выполняемые бадью: грузонесущую – выполняет корпус, а роль ограждающей тепловой стенки (экрана) играет вставка, не

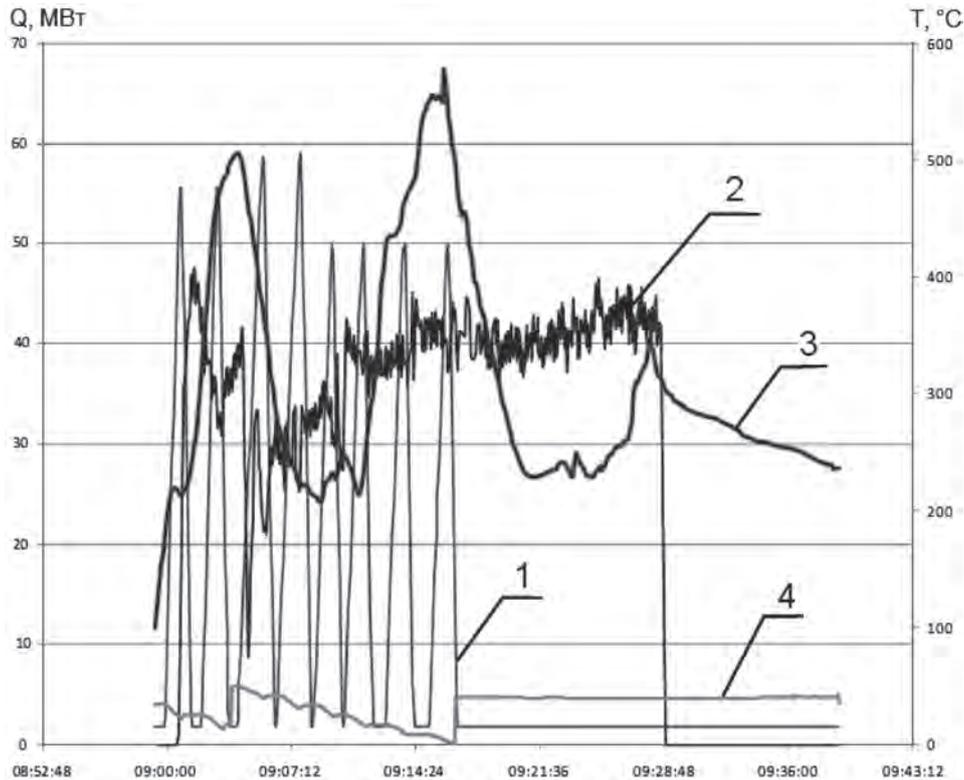


Рис. 10. Изменение температурного режима по ходу плавки: 1 – загрузка очередной порции 20 т; 2 – потребляемая мощность; 3 – температура отходящих газов; 4 – масса шихты в шахте подогревателя

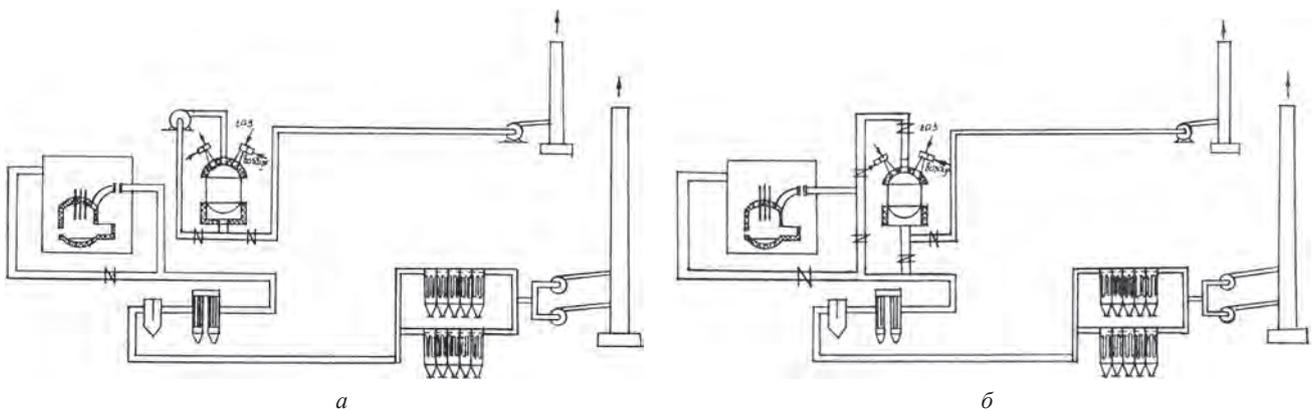


Рис. 11. Системы подогрева шихты в бадах: а – автономная; б – за счет тепла отходящих печных газов

испытывающая серьезных механических нагрузок (рис. 12).

Вставка полностью устраняет передачу тепла конвекцией от высокотемпературных газов к грузонесущему корпусу бады и вдвое снижает передачу тепла излучением. Заметная передача тепла корпусу за счет излучения от вставки происходит после нагрева последней до 750–1000 °С, т. е. в конце процесса нагрева шихты. Для того чтобы устранить при этом опасность перегрева несущего корпуса, в кольцевой зазор подается холодный воздух из коллектора, установленного по контуру свода. Снизить эффект теплоизлучения можно также путем нанесения отражающего покрытия на внутреннюю стенку корпуса бады.

Горячие газы сверху вниз проходят через слой шихты и отбираются в систему аспирации. Перед выбросом в атмосферу отходящие газы очищаются в батарее циклонов или скрубберов.

Установка (рис. 13) представляет собой конструкцию, состоящую из опорной стойки (колонны), в которой монтируется привод (гидро- или пневматический), поднимающий и поворачивающий свод в сторону на 60–90° футерованной крышки (свода) и основания, системы КИПиА и системы аспирации и очистки. Для размещения бады с шихтой служит футерованное основание, к которому подключается система аспирации.

На крышке устанавливаются горелки (от одной до трех), запальники, продувочный вентилятор

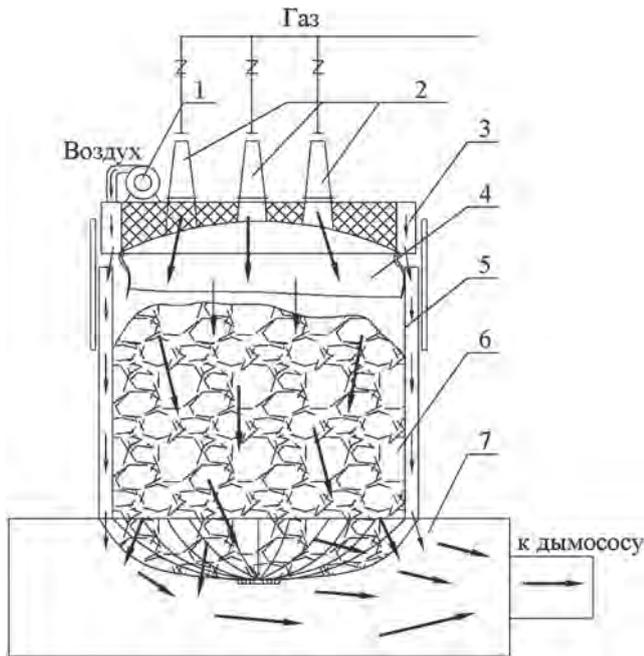


Рис. 12. Схема работы «бадьи-термоса»: 1 – продувочный вентилятор; 2 – горелки; 3 – коллектор обдува; 4 – огнестойкая завеса; 5 – вставка; 6 – нагреваемая шихта; 7 – корпус стэнда

и коллектор, подающий воздух в зазор между корпусом бадьи и вставкой.

Еще одним необходимым элементом является гибкая завеса высотой 250–350 мм, закрепленная по наружному краю крышки (по границе крышка – коллектор), которая в рабочем положении изолирует пространство внутри вставки от наружной атмосферы. Завеса может заменяться телескопической металлической обечайкой.

Важное условие – правильный выбор соотношения диаметров бадьи и крышки: футерованная часть крышки должна быть равна диаметру вставки, ширина коллектора – примерно равна ширине кольцевого зазора, а сопла для подачи воздуха расположены по окружности, проходящей по середине этого кольца.

Установка подогрева шихты оснащается системой КИПиА, которая контролирует разряжение под крышкой и в отводящем трубопроводе, температуру на входе и выходе из слоя шихты, давление и расход газа, время нагрева, состояние приводов и др., осуществляет управление (регулирование) процессом нагрева и обеспечивает безопасность работы установки.

Обычно используется управление работой установки по заданной температуре отходящих газов, которая однозначно связана с температурой нагрева шихты, но возможно также и по времени при стабильном технологическом режиме плавки.

Технология нагрева шихты в данной установке достаточно проста. Бадья-термос загружается обыч-

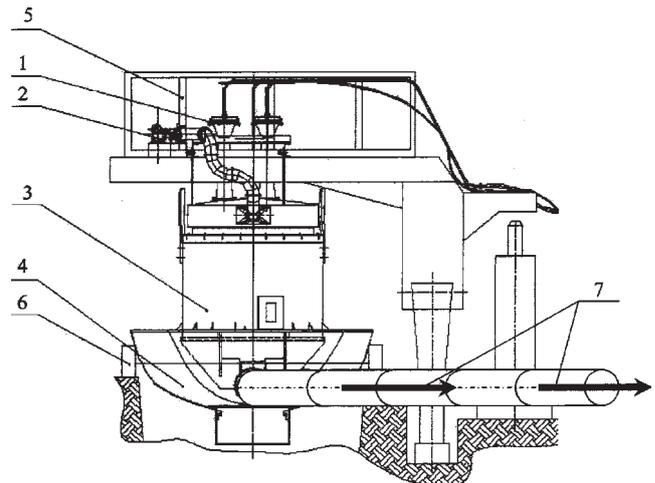


Рис. 13. Схема установки ВПШ с «бадьей-термосом»: 1 – система сжигания газа; 2 – свод; 3 – загрузочная емкость (корзина); 4 – стэнд; 5 – траверса; 6 – опора печи; 7 – система газоотвода

ной шихтой и устанавливается на основание установки. Крышка поворачивается и опускается в рабочее положение над бадьей. Завеса при этом должна касаться вставки. Включается система аспирации и в случае необходимости подача воздуха в кольцевой зазор. Затем включаются с помощью запальников горелки. Система управления устанавливает заданный режим по расходу газов и температуре. После достижения необходимой температуры нагрева или по времени (10–20 мин) горелки отключаются, крышка отводится в сторону, дымосос отключается и бадья с горячей шихтой краном подается на завалку в печь. Если печь не готова к загрузке, бадья с шихтой передается на пост ожидания, где во избежание охлаждения накрывается крышкой. Воздушный зазор между обечайкой и корпусом является хорошим теплоизолятором, уменьшающим скорость охлаждения.

В установке, использующей бадью-термосы, при работе с традиционной шихтой по практическим данным термический к.п.д. составляет в среднем за цикл нагрева 85%. В начальный период к.п.д. достигает 90–95% и по мере прогрева слоя шихты снижается до 65–70% за счет уменьшения температурного напора.

Это обстоятельство проявляется в постепенном росте температуры отходящих газов от ~50 до 300–350 °С по мере нагрева шихты соответственно до $t_{cp} \approx 650\text{--}750$ °С (рис. 14).

До настоящего времени представляют определенные трудности расчеты процесса нагрева шихты в слое в нестационарных условиях, в частности, определение времени продолжительности нагрева до заданной температуры. По сложившейся практике его определяют опытным путем на уже изготовленной установке, изменяя режимы: количе-



Рис. 14. Мониторинг нагрева шихты на установке подогрева в завалочных бадьях на ОАО «Завод стальной дроби», г. Алчевск, Украина: k1 – температура отходящих газов на выходе из слоя шихты

ство подаваемого топлива, величину разряжения, высоту слоя и т. п., устанавливают длительность подогрева, требуемую по условиям работы плавильного отделения или экономическим показателям.

Исследования режимов нагрева шихты в слое в бадьях и шахтах позволяют сделать вывод о применимости для расчета процессов теплопередачи уравнения Фурье для нестационарной теплопроводности с граничными условиями I рода. При этом в уравнении вместо коэффициента теплопроводности слоя λ (как в каноническом) используется приведенный коэффициент конвекции α_k , умноженный на эквивалентный диаметр элементов слоя – куска шихты или канала для соответственно внешней или внутренней задачи:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\alpha_k d_{\text{э}}}{c_p} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$$

Для установок с бадьями небольшой емкости (до 10 т) приемлемым является использование одномерной схемы расчета, для бадей диаметром свыше 3 м более корректно расчет вести в цилиндрических координатах, считая распределение температур в горизонтальных сечениях пропорциональным радиусу.

Так как α_k служит функцией скорости потока, целесообразно при проектных работах провести расчеты параметров движения газов в слое на основе решений уравнений Навье-Стокса и Фурье-Кирхгофа, задавая градиенты температур по высоте слоя. Для этой цели можно использовать ППП ANSIS [19].

Примеры полученных решений показаны на рис. 15.

Расчеты теплопередачи в кольцевом зазоре бадьи-термоса не представляют трудностей и могут быть выполнены путем расчета суммарной передачи тепла турбулентным воздушным потоком от стенки вставки к корпусу бадьи и излучением от той же вставки, учитывая принцип суперпозиции, при отсутствии движения – теплопроводностью через воздушный зазор и излучением. Последний

фактор практически незначим до температуры вставки ≈ 500 °С.

Как показала практика, при использовании бадьи емкостью 5–6 т и интенсивности нагрева 10–15 мин с интервалом до очередного использования этой же бадьи 30–45 мин (работа с тремя бадьями) подача охлаждающего воздуха в кольцевой зазор не требуется (не обязательна). Потери тепла при этом уменьшаются на 5–10%.

В выбросах установок подогрева шихты, работающих на природном газе, не содержится вредных веществ, присущих выбросам дуговых печей, и концентрации вредных веществ в отходящих газах, как правило, существенно ниже.

Однако при использовании сильно загрязненного тонколистового скрапа, стружки или брикетов количество вредных веществ и прежде всего органики (ЛОС) соответственно возрастает. В этом случае необходимо их дожигать на выходе из бадьи. Время реакции горения отходящих газов рассчитывается по кинетическим уравнениям для каждого компонента, включая ЛОС, и задается наибольшее. При температурах горения больших 750 °С это время составляет десятые доли секунды. Для увеличения эффективности дожигания целесообразно вводить факел горелки в камеру дожигания тангенциально.

Учитывая, что основание установок ВПШ в бадьях-термосах представляет собой футерованную камеру объемом, соизмеримым с бадьей, что обеспечивает необходимое время пребывания газов в зоне горения, для дожигания отходящих газов достаточно ввести в основание установки горелку-запальник.

По результатам промышленной эксплуатации получены следующие соотношения расходов энергоносителей, позволяющие оценить эффективность разработанных установок ВПШ в бадьях-термосах: при затратах природного газа на уровне 11–13 м³ сокращение расхода электроэнергии составило 150–180 кВт·ч на 1 т шихты. Меньшие расходы газа соответствуют условиям нагрева

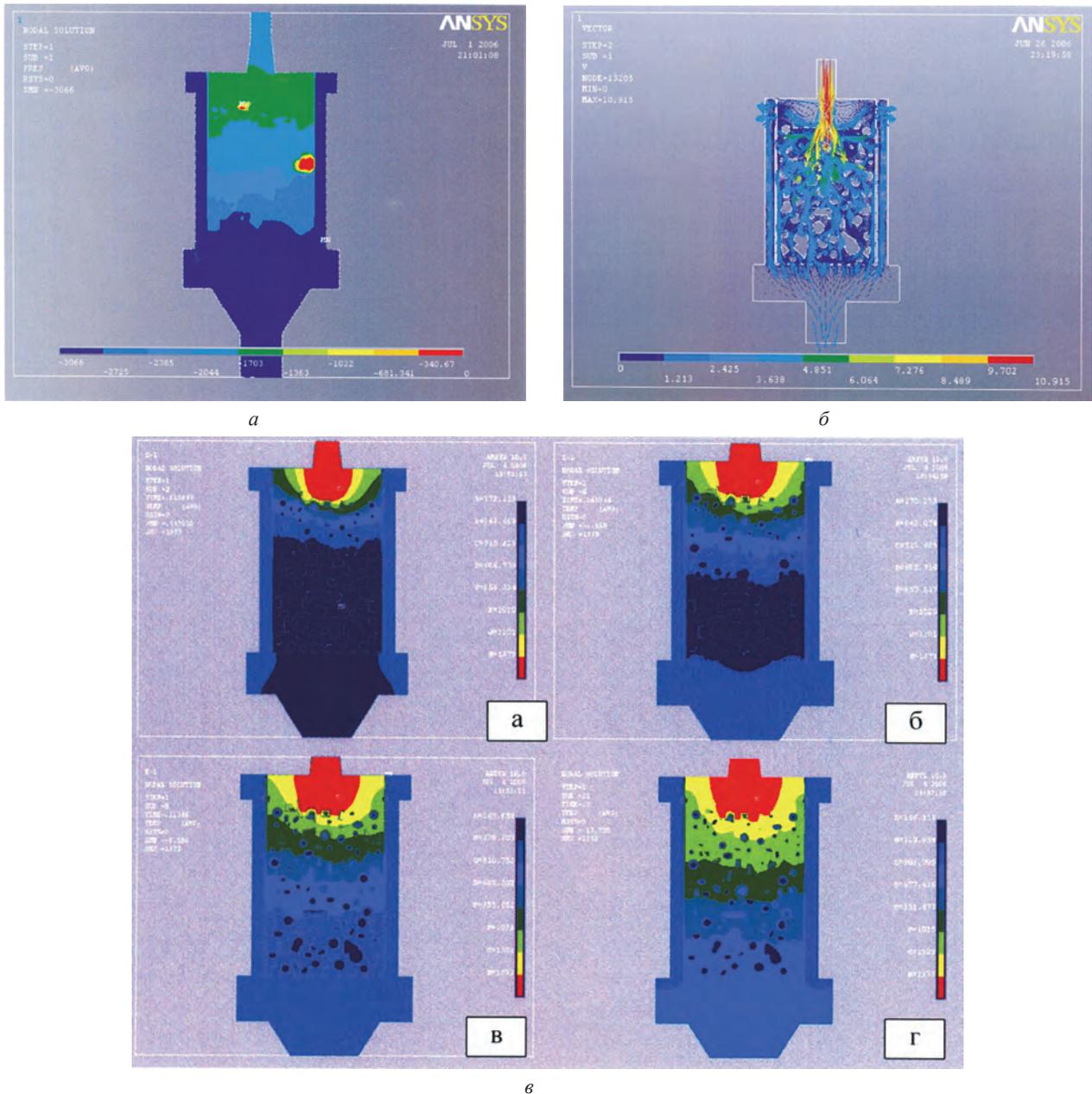


Рис. 15. Компьютерное моделирование нагрева шихты в загрузочных бадьях-термосах: *а* – распределение давлений в бадье при наличии дополнительной подачи воздуха со скоростью 3 м/с в зазор; *б* – суммарные значения мгновенных скоростей газового потока в моделируемом слое шихты, $v_0 = 10$ м/с; *в* – изменение во времени поля температур в слое шихты при $v_0 = 10$ м/с и $t_{\text{газ}} = 1200$ °С

шихты с меньшей интенсивностью (скорость нагрева 1 м слоя за 10 мин) и приведенной толщиной кусков шихты 30–50 мм, большие расходы – для быстрого нагрева: примерно 2 м слоя за 10 мин в тонколистовом скрапе.

Высокий к.п.д. установок ВПШ в бадьях-термосах обусловлен двумя факторами: во-первых, приведенная аккумулирующая теплоемкость слоя шихты – «водяное число» в расчете теплопередачи по методике Б. В. Китаева значительно больше «водяного числа» теплоносителя – продуктов сжигания газа, во-вторых, достаточно низкие температуры корпуса бадьи (корзины).

Количество тепла, теряемое бадьей в данных установках, при нагреве шихты до 750 °С незначительно. За время работы температура корпуса повышается от 0 до 300 °С (максимум). При этом потери тепла за счет естественной конвекции от вертикальной стенки корпуса со средней температурой 140–200 °С могут быть рассчитаны по уравнению:

$$q = \alpha(t_n - t_0)F\tau, \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где $\alpha = \kappa\sqrt[4]{t_n - t_0} + \frac{\sigma_0\varepsilon(T_n^4 - T_0^4)}{t_n - t_0}$, Вт/(м²·К) – приведенный коэффициент теплоотдачи, учитываю-

ший естественную конвекцию и излучение; τ – время.

Для вертикальных поверхностей коэффициент $k = 2,4$, коэффициент излучения $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$) при степени черноты $\varepsilon = 0,8$ (для стального листа). Отсюда $\alpha \approx 2 - 9$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$). За 15 мин работы потери составят примерно 2–3 МДж на 1 т шихты, что эквивалентно расходу газа $\sim 0,12$ $\text{м}^3/\text{т}$ шихты.

Количество тепла, уносимое воздухом, продуваемым через кольцевой зазор, зависит от интенсивности продувки и температуры вставки.

Тепло передается конвекцией (вынужденной), так как излучение от вставки не может заметно восприниматься воздухом.

Плотность теплового потока в зазоре можно рассчитать при этом по формуле для расчета количества тепла, передаваемого от дымовых газов к воздуху через металлическую стенку:

$$Q = K \Delta t_{\text{ср}} F_3, \text{ кДж},$$

где K – суммарный коэффициент теплопередачи: $K = \alpha_{\text{в}} \alpha_{\text{д}} / (\alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{д}})$; $\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя логарифмическая разность температур газов и воздуха:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{н}} - \Delta t_{\text{к}}}{\ln \Delta t_{\text{н}} / \Delta t_{\text{к}}}.$$

Здесь $\Delta t_{\text{н}}$, $\Delta t_{\text{к}}$ – разность температур газов внутри бады и воздуха в кольцевом зазоре в верхней и нижней части бады. В данном случае отношение $\Delta t_{\text{н}}/\Delta t_{\text{к}} \approx 3$, т. е. больше критического значения – 0,6 и поэтому $\Delta t_{\text{ср}}$ можно рассчитывать как среднеарифметическое.

В данном случае тепло передается практически только за счет конвекции от дымовых газов к стенке обечайки и от нее воздуху, т. е. $\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{кв}}$ и $\alpha_{\text{д}} = \alpha_{\text{кл}}$.

Скорость движения дымовых газов внутри бады составляет ориентировочно 10–15 м/с при рабочих условиях и порозности $< 0,4$. Коэффициент теплопередачи в этих условиях составляет $K = 18 - 20$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$). Отсюда потери составят при максимальной продувке до 30 МДж/т или $\sim 0,86$ м^3 природного газа на 1 т шихты. Эти потери могут быть исключены при использовании для нагрева шихты нескольких сменных бадей, позволяющих обеспечить паузу между циклами нагрева шихты для охлаждения корпуса. На практике это количество составляет 2–3 бады на одну установку ВПШ.

Таким образом, потери тепла в установках ВПШ с бадыями-термосами обусловлены практически только температурой отходящих газов и легко поддаются контролю и управлению.

После апробации установок подогрева шихты с бадыями-термосами в сталелитейных цехах пред-

приятый БелАЗ (г. Могилев) и МТЗ (г. Минск) аналогичная установка была внедрена на ОАО «Завод стальной дробы» в г. Алчевск (Украина) (рис. 16).

В заключение приведем некоторые данные, характеризующие экономическую эффективность установок ВПШ в бадыях-термосах.

Стоимость установок определяется мощностью (производительностью) и комплектацией. Кроме механического и нестандартного оборудования, в состав установки входят газооборудование, системы аспирации и очистки и система КИПиА. Доработка традиционных бадей (корзин) незначительна. Стойкость обечаек из конструкционной стали 3–4 мес., из жаростойкой – год и более.

Для обслуживания установки дополнительный персонал не требуется.

Эффект от замены электроэнергии природным газом можно определить методом последовательных приближений.

Энтальпия шихты (стального скрапа) при нагреве до 700 °С составляет: $Q_{\text{ш}} = C M t = 370,3$ МДж или 102,9 кВт·ч на 1 т. Это эквивалентно расходу $W_{\text{г}} = 10,6$ м^3 газа.

Тепло, теряемое с отходящими газами со средней за период нагрева температурой 200 °С: $Q_{\text{отх.1}} = C \cdot 10 W_{\text{г}} t_{\text{отх}} = 29,2$ МДж. Суммарные затраты: $Q_{\Sigma} = Q_{\text{ш}} + Q_{\text{отх.1}} = 399,5$ МДж, что эквивалентно $W_{\text{г}} = 11,4$ м^3 газа.

Пересчет потерь тепла дает величину: $W_{\text{отх.г}} = 1,38 \cdot 10 W_{\text{г}} \cdot 200 = 31,4$ МДж. Суммарные затраты: $Q_{\Sigma} = 401,7$ МДж, что эквивалентно 11,5 м^3 газа.

Учитывая, что потери тепла через стенку и свод составляют не более 5–10% (в среднем 7,5%), расход составит 12,4 м^3 против теоретического 10,6 $\text{м}^3/\text{т}$. Отсюда к.п.д. установки: $\eta = 85,5\%$.

В электродуговой печи с к.п.д. в период нагрева шихты $\eta = 60$ (максимально): для передачи шихте $Q_{\text{ш}} = 102,9$ кВт·ч тепловой энергии затрачивается $E = \frac{Q_{\text{ш}}}{\eta} = 171,4$ кВт·ч электроэнергии.

Таким образом, согласно расчету с учетом к.п.д. агрегатов, при нагреве шихты до 700 °С и затратах 12,4 $\text{м}^3/\text{т}$ экономия составит более 170 кВт·ч.

Далее для сравнения затрат необходимо умножить полученные удельные расходы теплоносителей на их стоимость и объем выплавки металла.

При более строгом расчете экономического эффекта следует учитывать также сокращение удельного расхода электродов примерно на 20%, снижение затрат на футеровку, уменьшение объема выбросов, прежде всего пыли, примерно на 25–30%, что соответственно снижает затраты на очистку.



а



б



в

Рис. 16. Производственные установки ВПШ с «бадей-термосом»: а – РУП «МТЗ» (г. Минск); б – ОАО «Завод стальной дроби» (г. Алчевск, Украина); в – ОАО «БелАЗ» (г. Могилев)

Необходимо учитывать возможность увеличения в шихте доли низкокачественного скрапа на 10% и более без снижения качества жидкого металла.

Повышение на 15–20% производительности печей в ряде случаев позволяет решить задачу увеличения объемов производства без закупки дополнительных печей.

Практика показала, что окупаемость установок ВПШ на базе бадей-термосов составляет 3–6 мес. в зависимости от объема производства и конъюнктуры цен на энергоносители. Провести модернизацию производства жидкого металла путем внедрения автономных установок такого типа можно без остановки основного оборудования.

Кроме того, внедрение установки ВПШ обеспечивает повышение безопасности плавки, устойчивости работы дуги, снижение уровня шума до 75–85 дБ, устранение неорганизованных выбросов вредных веществ в рабочую зону.

Финансовую составляющую перечисленных факторов трудно оценить, однако их важность и положительное значение не вызывают сомнений.

Выводы

Высокотемпературный предварительный подогрев шихты при электроплавке является эффективным средством интенсификации плавки, сокращения затрат электроэнергии, повышения безопасности и улучшения экологических параметров плавки. Для действующих цехов наиболее перспективным представляется способ подогрева в загрузочных бадах-термосах за счет природного газа. При новом строительстве альтернативой могут служить комплексные агрегаты, включающие печь и устройство подогрева шихты за счет тепла отходящих газов с порционной или непрерывной завалкой.

Исследование и выявление закономерностей процессов тепломассообмена в слое скрапа при вы-

сокотемпературном нагреве отходящими печными газами и/или продуктами сжигания природного газа с учетом деструкции органических загрязнений шихты, создание методики расчета физико-химических параметров процессов нагрева шихты в продуваемом слое, разработка и апробация установок по-

догрева шихты и последующее широкое (а возможно, и обязательное) их применение при электроплавке – одно из наиболее перспективных направлений технического прогресса в металлургии и литейном производстве и эффективное средство ресурсосбережения и снижения стоимости продукции.

Литература

1. Найдек В. Л., Костяков А. А., Волошин А. А. Современная электрометаллургия. 2009. № 2.
2. Ткаченко С. С., Кривицкий В. С. Проблемы модернизации литейного производства станкостроения // Литейное производство. 2012. № 5.
3. Смирнова Е. Ю. Использование тепла отходящих газов ДСП для подогрева шихты // Электрометаллургия. 2003. № 10.
4. Райле В. Пути повышения эффективности подогрева металлолома в электросталеплавильных агрегатах // Электрометаллургия. 2012. № 5.
5. Еланский Д. Г. Тенденция развития электросталеплавильного производства // Электрометаллургия. 2001. № 5.
6. Лишак С. Д., Макаров Д. М., Кацов Е. З. Перспективы и эффективность предварительного подогрева лома для дуговых сталеплавильных печей // Черная металлургия. 1988. № 5.
7. Technoeconomic Assessment of Electricity Steelmaking Through the Year 2000. EPRI Report. EM-5445.
8. Пути снижения расхода энергетических ресурсов в литейном производстве // ИТЦМ «Металлург». М., 2001.
9. Супрун В. Н. Подогрев лома // Рынок вторичных материалов. 2003. № 3.
10. Стеблов А. Б., Мажейко А. В., Стеблова Э. А. Пути снижения затрат при выплавке стали // Металлург. 2006. № 11.
11. Schmitt R. Y. Electric Arc Furnace Scrap Preheating // CMP. Pittsburgh. 1997.
12. Fontana A. EAF Scrap Preheating Technologies. Victoria, Australia // High Tempr. Pr. Symposium. 2012.
13. Фукс Г., Кнапп Х. и др. // Электрометаллургия. 2000. № 8.
14. Райле В. Т., Рощин В. Е. Совершенствование работы шахтных подогревателей второго поколения // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Металлургия. 2010. № 13. Вып. 14.
15. Rumler K., Tynaboyl A. Scrap Preheating and Continuous Charging System // MPT Int. 2011. № 5.
16. Лопухин Г. А. Состояние и тенденции развития электросталеплавильного производства // Электрометаллургия. 2000. № 7.
17. Ровин С. Л., Ровин Л. Е., Жаранов В. А. и др. Установки подогрева шихты для электроплавки // Литье и металлургия. 2006. № 2.
18. Патент РФ № 7458 от 28.12.2010 г.
19. Ровин Л. Е., Жаранов В. А., Ровин С. Л. Интенсивные режимы нагрева шихты // Литье и металлургия. 2008. № 3.