



*It is shown that analysis of heat balances in most cases allows to determine efficiency of furnace working and to control the processes and operate the thermal regime in narrow limits of parameters changing as well.*

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, НАН Беларуси, С. В. КОРНЕЕВ, ИТМО НАН Беларуси,  
Н. Л. МАНДЕЛЬ, Д. К. ГРИБОК, БНТУ

УДК 669.04

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ШИХТЫ

### Введение

При разработке эффективных процессов выплавки стали в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) необходимо решать комплекс сложных задач: достижение максимальной производительности печи и максимального коэффициента полезного действия, получение необходимого качества стали, минимизация затрат на шихту и материалы.

В связи с тем что основным материалом при получении стали в ДСП является металлический лом и стоимость его составляет основную часть стоимости получаемой стали, вопрос выбора вида лома имеет большое значение. Даже в пределах одной группы вид лома может сильно отличаться, а использование металлошихты в виде пакетов, брикетов и стружки требует детального исследования процесса их нагрева и плавления, а также угара и эффективности работы печи. К недостаткам использования металлического лома можно отнести то, что многократный переплав приводит к увеличению загрязненности его примесями цветных металлов, поэтому для получения сталей высокого качества требуется добавлять к лому некоторое количество более чистого сырья, например металлизированных окатышей. Использование нескольких видов лома, а также чугуна и металлизированных окатышей приводит к необходимости определения рациональной шихтовки загружаемых в печь материалов, а также оптимального времени их подвалки.

### Тепловой баланс современной ДСП

Эффективность того или иного процесса принято характеризовать коэффициентом полезного действия. При выплавке стали в дуговых печах, кроме термического и полного коэффициента полезного действия, необходимо также учитывать коэффициент расхода металлошихты.

Исследование работы дуговых сталеплавильных печей, как правило, начинают с анализа тепловых балансов. При этом рассматривают два вида потерь (электрические и тепловые) и два вида энергетического баланса (баланс энергии и баланс мощностей).

Составлению энергетического баланса предшествует расчет материального баланса, точность определения которого может значительно повлиять на конечный результат.

Исходными данными для расчета материального баланса являются массы материалов, подаваемых в печь, и их состав, а для расчета теплового баланса – различные технологические параметры, такие, как расходы и температуры воды, подаваемой на охлаждение элементов печи, температура уходящих газов и т.д.

В общем виде баланс энергии записывается следующим образом.

#### Расход энергии

Статьи расходной части баланса описываются уравнением вида

$$Q_{\Sigma}^{\text{расх}} = Q_{\text{физ}}^{\text{ст}} + Q_{\text{физ}}^{\text{ст.шл}} + Q_{\text{физ}}^{\text{шл}} + Q_{\text{физ}}^{\text{ух.г}} + Q_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{дым}} + Q_{\phi} + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{отк}} + Q_{\text{э.п.}}$$

где  $Q_{\text{физ}}^{\text{ст}}$  – физическая теплота стали, МДж;  $Q_{\text{физ}}^{\text{ст.шл}}$  – физическая теплота стали, теряемой со шлаком, МДж;  $Q_{\text{физ}}^{\text{шл}}$  – физическая теплота шлака, МДж;  $Q_{\text{физ}}^{\text{ух.г}}$  – потери теплоты с уходящими газами, МДж;  $Q_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{дым}}$  – теплота, уносимая частицами  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , МДж;  $Q_{\phi}$  – потери теплоты теплопроводностью через футеровку, МДж;  $Q_{\text{охл}}$  – потери теплоты с охлаждающей водой, МДж;  $Q_{\text{отк}}$  – потери теплоты излучением, МДж;  $Q_{\text{э.п.}}$  – потери электрической энергии за период плавки, МДж.

*Приход энергии*

Статьи приходной части энергетического баланса описываются выражением

$$Q_{\Sigma}^{\text{прих}} = Q_{\text{ш}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{экз}} + Q_{\text{т.к.г.}} + Q_{\text{ш.о.}} + Q_{\text{гор}} + Q_{\text{б}},$$

где  $Q_{\text{ш}}$  – теплота, вносимая шихтой, МДж;  $Q_{\text{д}}$  – теплота, вносимая электрическими дугами, МДж;  $Q_{\text{экз}}$  – теплота химических экзотермических реакций окисления примесей металла и окисления металла, МДж;  $Q_{\text{гор}}$  – теплота горения кокса и электродов, МДж;  $Q_{\text{т.к.г.}}$  – теплота, выделяемая при работе стеновых газокислородных горелок, МДж;  $Q_{\text{ш.о.}}$  – теплота шлакообразования, МДж;  $Q_{\text{б}}$  – теплота, вносимая за счет “болота”, МДж.

Рассмотрим тепловой баланс периода расплавления в ДСП-100 кордовой марки стали, отражающий современное состояние выплавки в высокомошных ДСП.

Основными шихтовыми материалами, загруженными в рабочее пространство печи в период расплавления, являются: лом – 70500 кг; чугун П2 – 15300 кг; всего скрапа – 85 800 кг.

Кроме того, до конца периода расплавления и замера температуры расплава ( $t=1581$  °С) загружено 9828 кг окатышей.

Тепловой баланс периода расплавления приведен в таблице.

**Тепловой баланс периода расплавления**

Приход тепла	МДж	%	Расход тепла	МДж	%
Тепло от шихты и “болота”	10 927	4,7	Физическое тепло стали	130 889	57,6
Тепло от электроэнергии	140 783	61,1	Физическое тепло шлака	6 619	2,9
Тепло от топливно-кислородных горелок	18 122	7,9	Тепло, уносимое уходящими газами и Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	54 398	23,9
Тепло экзотермических реакций окисления элементов шихты и железа	42 845	18,6	Тепло, уносимое с охлаждающей водой	23 780	10,5
Тепло от горения кокса и электродов	17 567	7,6	Потери с электроэнергией	8 447	3,7
			Потери тепла открытой печью	1523	0,7
			Потери тепла через наружную поверхность	1368	0,6
Итого	230 244	100	Итого	227 024	100
Невязка	3220	1,4			

Из анализа результатов расчета тепловых балансов для современных высокомошных печей можно отметить, что:

1) в общем приходе теплоты значительную роль играют экзотермические реакции окисления элементов шихты и железа, а также горения углеродсодержащих материалов, находящихся в печи;

2) значительная энергия теряется с уходящими газами и охлаждающей стеновые панели и другие элементы водой;

3) потери через футерованную часть печи, а также излучением при открытой печи крайне незначительны и их можно считать постоянными ввиду их малости.

**Анализ применения различных видов шихты**

При выплавке стали в ДСП применяются различные виды металлошихты, основная часть которой регламентируется ГОСТ 2787-75.

Качество лома определяется в основном по трем параметрам. Первый параметр характеризует содержание железа в ломе, второй – содержание загрязняющих элементов и в первую очередь цветных металлов, третий – его насыпную плотность и максимальные размеры.

Повышенное содержание вредных примесей в шихтовых материалах усложняет технологию и ухудшает показатели производства стали. Так, повышенное содержание фосфора в исходном расплаве требует увеличения расхода шлакообра-

зующих и окислителей, продолжительности дефосфорации металла и всей плавки, увеличения расхода электроэнергии и т.д. Высокое содержание примесей цветных металлов в шихте снижает качество производимой стали.

Практика использования тяжеловесного лома ( $\rho > 2,5 \text{ т/м}^3$ ) показывает, что при увеличении средней насыпной плотности лома заметно возрастает расход энергии на плавление шихты и длительность периода плавления, при этом значительно ухудшаются условия работы футеровки стен вследствие доплавления крупных тяжелых кусков шихты открытой дугой.

В связи с возрастанием длительности периода плавления в высокомошных дуговых печах при увеличении доли тяжеловесного лома в завалке рекомендуется использовать не более 40% тяжеловесного лома, загружая его в нижнюю часть первой бадьи, а остальную часть шихты составлять из легковесного лома с насыпной плотностью  $0,8-1,2 \text{ т/м}^3$ .

Тугоплавкий плотный лом следует загружать под электроды в зону действия дуг, чтобы ускорить его плавление. Такой лом не нужно размещать у водоохлаждаемых панелей стен, где его плавление неизбежно связано с тепловыми перегрузками футеровки стен.

При пакетировании из лома и отходов с насыпной плотностью  $0,2-0,4 \text{ т/м}^3$  можно получать пакеты плотностью до  $2,5 \text{ т/м}^3$ . Скорость плавления в сравнении с плавлением легковесного лома, как правило, существенно не изменяется. Недостатком метода пакетирования является невозможность удаления из готового пакета различного рода примесей.

Использование стальной стружки при плавке стали в электропечах россыпью не ухудшает качество металла, приводит к снижению суммарного расхода электроэнергии, но к увеличению удельных энергозатрат. К недостаткам можно отнести большой объем для завалки и повышенный угар.

Чугун, кроме того, что имеет пониженное содержание вредных примесей, является шихтовым материалом, при плавлении которого выделяется большое количество энергии экзотермических реакций окисления углерода и кремния. Применение чугуна в твердом виде требует особой аккуратности при расположении его в рабочем пространстве печи, так как при плавлении крупных кусков может возникать так называемый «эффект айсберга».

#### Энергетические отличия в работе ДСП на различной металлошихте

Результаты изменения варианта шихтовки можно проиллюстрировать на технологии производства кордовой стали. За время эксплуатации ДСП №3 РУП «БМЗ» применялись следу-

ющие варианты технологии производства кордовой стали:

- 1) с использованием 85–100% металлizedованных окатышей;
- 2) с частичным использованием металлizedованных окатышей (не более 50%);
- 3) без использования металлizedованных окатышей на 100%-ном ломе.

Технология выплавки кордовой стали на шихте с использованием до 100% металлizedованных окатышей была внедрена первой. Опыт работы по указанной технологии выявил ряд недостатков. Использование в шихте до 100% металлizedованных окатышей сопряжено с вводом в печь повышенного количества кремнезема. Для его нейтрализации и поддержания основности не менее 2 необходимо увеличивать расход извести на плавку. Вследствие увеличения массы шлака происходит увеличение расхода электроэнергии. Так, расход электроэнергии на выплавку кордовой стали при использовании до 100% окатышей в среднем на 25% выше, чем при плавке на металлоломе.

В результате на РУП «БМЗ» разработаны и внедрены технологии выплавки кордовой стали с заменой части металлizedованных окатышей металлоломом и на металлоломе без использования металлizedованных окатышей. Для повышения содержания углерода в металле после расплавления шихты используют передельный чугун в количестве до 20% от общего количества металлошихты. Технология загрузки скрапных корзин предусматривает загрузку передельного чугуна на металлический лом сверху в равных количествах в завалку и подвалку.

Энергетические потребности плавления окатышей примерно на 30–40% выше, чем лома. Характер изменения расхода электроэнергии на плавку в целом при увеличении количества металлizedованных материалов в шихте обусловлен действием двух групп факторов. Увеличение расхода связано с ростом энергетических потребностей плавления и небольшим снижением коэффициента использования электроэнергии. Сокращению расхода способствует снижение потерь тепла от замены подвалок шихты непрерывной ее загрузкой и уменьшения длительности доводки при совмещении окислительного периода с плавлением, а также меньшего содержания примесей в шихте.

Для определения оптимального варианта состава металлошихты при выплавке кордовой стали с целью снижения тепловых потерь и расхода электроэнергии, длительности плавки была проведена выборка массива производственных плавков кордовых марок сталей в ДСП-100 №3 (по каждому варианту шихтовки). Обработку массива параметров по каждой группе плавков проводили математическим и статистическим методами теории случайных процессов с использованием кор-

реляционного анализа. В результате обработки данного массива параметров была выявлена наиболее значимая теснота связей между исследуемыми энергетическими и технологическими параметрами процесса и отмечено, что наибольшее влияние на энерготехнологические параметры процесса оказывает количество окатышей в шихте. На основании полученных данных можно отметить, что наиболее целесообразными как с экономической, так и с технологической точек зрения являются второй и третий варианты шихтовки, которые имеют следующие основные показатели.

1. С использованием в металлошихте «чистого» лома 65–70 т, чугуна передельного 20–25 т и металлизированных окатышей 15–35 т длительность плавки составила 86–92 мин, время под током – 57–62 мин, удельный расход электроэнергии на 1 т жидкой стали – 529–549 кВтч/т.

2. С использованием в металлошихте «чистого» лома 80–85 т, чугуна передельного 15–20 т и металлизированных окатышей 21–25 т длительность плавки составила 75–90 мин, время под током – 52–57 мин, удельный расход электроэнергии на 1 т жидкой стали – 485–520 кВтч/т.

Кроме энергетической составляющей замены ломом металлизированных окатышей, в процессе плавки на РУП «БМЗ» исследовали влияние такой замены на качество получаемой стали и, в частности, на содержание азота [1]. В работе [1] также рассмотрена эффективность использования окалины в качестве окислителя.

#### Сопоставление тепловых балансов дуговой сталеплавильной печи для различных видов шихты

Трудность теоретического сопоставления тепловых балансов плавки с различным соотношением шихтовых материалов заключается в том, что будут отличаться динамика нагрева и плавления различной шихты, а, следовательно, и статьи баланса. Для решения данной проблемы необходимо либо детальное моделирование процесса плавления шихты в ДСП, либо проведение опытных плавки при фиксировании максимально возможного количества характеристик.

При изменении соотношения загружаемых материалов будут изменяться следующие параметры плавки.

*Теплота от электроэнергии.* Теплота, получаемая печью от излучающих дуг, зависит от их мощности и времени плавления под током. При работе на шихте различного состава количество шлакообразующих будет разным, поэтому время плавления также будет изменяться. Влияние технологических параметров на производительность печи и расход электроэнергии рассмотрено в [2]. Кроме вида шихты, на мощность и время плавления оказывают влияние также способ и момент подвалки [3].

*Тепло экзотермических реакций окисления элементов шихты.* Производственный опыт свидетельствует о том, что в конце периода расплавления химический состав расплава практически одинаков вне зависимости от количества чугуна и других углеродсодержащих материалов. Таким образом, при увеличении количества углеродсодержащей шихты будет повышаться выделение энергии экзотермических реакций.

*Угар железа и тепло, уносимое железом в дым.* Наиболее зависимая от состава и параметров шихты статья баланса. С другой стороны, значительная часть угара металла происходит в жидкой ванне [4, 5], поэтому различие в угаре шихты будет в основном до ее попадания в ванну.

*Тепло, уносимое уходящими газами.* В процессе теоретического определения данной статьи баланса возникают определенные методические трудности. Количество теплоты, уносимой уходящими газами, зависит от количества выделившихся газов, их температуры и химического недожога. В связи с тем что химический недожог в рабочем пространстве ДСП теоретически определяется очень грубо, а потенциал выделения энергии составляет значительную величину, то данная статья теплового баланса может иметь большую погрешность. Для примера по результатам расчета теплового баланса плавки кордовой марки стали количество уходящего СО равно 11%, а кислорода – 2% от общего количества уходящих газов. Из различных литературных источников [6] (экспериментальный анализ газов, покидающих печь) известно, что количество СО в период расплавления составляет 4–16%, а кислорода – до 10%. Таким образом, при сопоставлении тепловых балансов данная статья, по возможности, должна определяться исходя из экспериментальных данных.

#### Выводы

Анализ тепловых балансов в большинстве случаев позволяет определить эффективность работы печи, а также контролировать процессы и управлять тепловым режимом в узких пределах изменения параметров.

Сопоставление балансов плавки при различных шихтовках требует анализа конкретных плавки для заданных вариантов шихтовки, где известно количество потребленной энергии загруженных материалов и продуваемых через расплав и уходящих газов.

Сопоставление балансов, основанное на теоретических представлениях о процессах, происходящих в ДСП, требует углубленных исследований по тем статьям баланса, которые значительно зависят от применяемых шихтовых материалов.

#### Литература

1. Афанасиади А.Г., Эндерс В.В., Гуляев М.П. Исследование и разработка технологии выплавки качествен-

но кордовой стали на шихте из металлического лома // Литье и металлургия. 1998. №2. С. 38–41.

2. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В.А. Тимошпольский, Ю.В. Феоктистов, А.Б. Стеблов и др. Мн.: Наука и техника, 1992.

3. Попов Н.Н., Игнатов И.И. Определение времени подвалки шихты при плавке в дуговой сталеплавильной печи // Изв. вузов. Черная металлургия. 1986. №3. С. 47–51.

4. Свяжин А.Г., Киндоп В.Э. Кинетика окисления перемешиваемого расплава железа газообразным кислородом // Изв. вузов. Черная металлургия. 2006. №1. С. 3–5.

5. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Угар металла при продувке ванны ДСП кислородом // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. №3. С. 16–18.

6. Карасев В.П., Сутягин К.Л. Определение мощности тепловых потерь в дуговых сталеплавильных печах // Электрометаллургия. 2006. №3. С. 42–47.



Республиканская научно-техническая библиотека, один из крупнейших информационных центров Беларуси, предлагает специалистам ознакомиться с новыми патентами и полезными моделями по литью и металлургии.

Патент 2277133 РФ, МПК С22В 9/20 (2006.01).

### **СПОСОБ ЛИТЬЯ МЕТАЛЛА В ЕМКОСТИ С ПЕРЕМЕННЫМ НАКЛОНОМ И ВРАЩЕНИЕМ**

Патентообладатель: Волков Анатолий Евгеньевич (RU).

Изобретение может быть использовано для литья любых металлов, включая тугоплавкие и химически активные.

Способ включает приготовление расплава в отдельной промежуточной емкости с последующим его переливанием и кристаллизацией в изложнице. Методы плавки в промежуточной емкости с отливкой слитков обеспечивают высокую плотность слитков, однородный химический состав и достаточно однородную кристаллическую структуру. Данный способ нашел применение для изготовления круглых и плоских слитков небольшого сечения.

Использование наклона и вращения промежуточной емкости позволяет увеличить площадь обогрева ванны расплава. При вращении промежуточной емкости часть расплава поднимается за счет вязкостных свойств, выше горизонтального уровня основной ванны расплава. Происходит хорошее удаление летучих и газовых примесей из расплава, интенсивное перемешивание и усреднение состава.

Патент 2280702 РФ, МПК С22В 9/20 (2006.01) С22В 9/18 (2006.01) В22D 23/00 (2006.01)

### **УСТРОЙСТВО И СПОСОБ ДЛЯ РАФИНИРОВАНИЯ И ЛИТЬЯ**

Патентообладатель: Эй Ти Аи ПРОПЕРТИЗ, ИНК. (US).

Изобретение относится к устройству и способу для рафинирования и литья слитков и других заготовок из металлов и сплавов, склонных к сегрегации во время разливки.

Данный способ предполагает плавку и рафинирование металлического материала и его отливку методом зародышевого литья.

Предложенные устройство и способ можно использовать при рафинировании и литье сложных суперсплавов на основе никеля, таких, как сплавы 706 и 718, а также некоторых титановых сплавов, сталей и сплавов на основе кобальта, которые склонны к сегрегации при литье.

Предложенное устройство обеспечивает источник рафинированного расплавленного сплава, практически не содержащего вредных оксидов. Передаточное устройство обеспечивает способ передачи рафинированного расплавленного сплава в устройство для зародышевого литья с уменьшением возможности повторного загрязнения оксидами.

Патент 2283202 РФ, МПК В22D 11/12 (2006.01)

### **УСТРОЙСТВО ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ МЕТАЛЛОВ, В ЧАСТНОСТИ СТАЛИ**

Патентообладатель: СМС ДЕМАГ АКЦИЕНГЕЗЕЛЛЬШАФТ (DE).

Изобретение относится к металлургии.

В основе изобретения лежит задача создания лучшей защиты установки в зоне кристаллизатора для непрерывной разливки и расположенных за ней узлов.

Описанный вид экранирования предпочтителен, в частности, у осциллирующих резонансным способом кристаллизаторов для разливки блюмов, поскольку они содержат неподвижную раму.

**Документы не продаются!**

Ознакомиться с предложенными изданиями можно в читальном зале патентных документов Республиканской научно-технической библиотеки (к. 503). Библиотека также оказывает дополнительные услуги по копированию и сканированию фрагментов документов, записи на дискету, CD-ROM, флэш-карту и др. Более подробную информацию о режиме работы и услугах можно получить по адресу: 220004, г. Минск, проспект Победителей, 7, РНТБ, тел. 203-31-00, [www.rlst.org.by](http://www.rlst.org.by), e-mail: [edd@rlst.org.by](mailto:edd@rlst.org.by).