



The method of "instant" calculation of heat and material balances of melting, which can be used for various steel grades and for electric arc furnaces of different capacities, is developed. The possibility of the calculations of steel smelting both with application of melting intensification and by the traditional method is realized.

Д. В. ВЕДЫБЕДА, ОАО «БМЗ – управляющая компания холдинга «БМК»

УДК 669.74

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ ПЛАВКИ С ОБРАБОТКОЙ СТАЛИ НА ПЕЧЬ–КОВШЕ НА ПРИМЕРЕ ДСП–100

Методика расчета¹ представляет собой совокупность взаимосвязанных между собой зависимостей, в основу которых положены традиционные методы расчета материальных и тепловых балансов электроплавки [1, 2]. Это дает возможность быстро рассчитать и подобрать количество и состав шихтовых материалов для конкретных марок сталей. При этом рассчитать количество затрачиваемых энергоресурсов, ферросплавов и добавочных материалов, количество и состав шлака, объем дымовых газов, выход жидкого металла, химический состав стали после расплавления шихты в печи и обработки печного полупродукта на агрегате печь-ковш и многие другие показатели.

Для теоретического расчета плавки в отдельную таблицу необходимо ввести количество шихтовых материалов, из которых планируется получить заданную марку стали. В исходные данные можно также вводить процент засоренности по каждому виду шихтового материала.

Для регулирования количества задаваемых ферросплавов во время внепечной обработки в таблицу вводится в процентах по массе количество углерода, кремния, марганца, хрома и другие элементы, которые предполагается получить в готовой стали в соответствии с требованиями по химическому составу для рассчитываемой марки стали. В зависимости от целей расчета можно вводить значения по элементам как по нижнему пределу для рассчитываемой марки стали, так и по верхнему пределу либо по заданным значениям.

Следует отметить, что в описываемой методике в расчет введен процент засоренности металлошихты. При выполнении расчетов в качестве загрязняющего вещества принята земля (чаще всего

металлолом загрязнен землей, которая попадает в печь при загрузке шихтовых корзин грейферами, нередко случаи наличия неметаллической части шихты в емкостях и трубах, пакетах и т. п.). Можно ввести различные загрязнители, которые могут попасть вместе с шихтой в печь, если известны элементарный химический состав и количество неметаллической части шихты. Для этого в методике разработана специальная таблица, в которую вводится химический состав загрязняющих металлолом веществ, затем путем интеграции этих данных в дальнейший расчет элементы загрязнителей в зависимости от химических свойств попадают в дымовые газы, расплав или шлак.

Ввод элемента засоренности металлолома дает возможность приблизить результаты расчета плавки к реальным условиям. В качестве загрязняющего вещества можно принять и цветные металлы, в неметаллическую часть шихты могут входить минеральные удобрения, серосодержащие отходы, бетон, земля и др. Например, в нашем случае с землей все химические элементы в данном загрязнителе находятся в виде оксидов, методика позволяет распределить оксиды случайно либо вручную таким образом, чтобы часть этих оксидов перешла в шлак, часть в пыль, часть в расплав.

Распределение химических элементов в неметаллической части в расчете принято следующим: углерод улетучивается в виде оксида в дым; такие элементы, как марганец, кремний, фосфор, железо, магний, хром, кальций в виде оксидов переходят в шлак и дымовые газы (реализована возможность случайного либо ручного распределения); медь, сера и никель переходят в расплав, т. е. условия распределения элементов упрощены.

Методика позволяет рассчитывать химический состав полупродукта после расплавления задавае-

¹ В качестве инструмента были использованы электронные таблицы Microsoft Office Excel.

мых в печь шихтовых материалов. В этом расчете учитываются угары по всем основным элементам в процессе расплавления металлозавалки. Химический состав расплавленного полупродукта рассчитывается по следующим элементам: углероду, марганцу, кремнию, фосфору, сере, никелю, хрому, меди и железу, которые характерны для большего числа сталей. Если в составе стали имеются такие элементы, как ванадий, титан, вольфрам и др., то можно добавить соответствующие элементы для расчета содержания их в завалке.

Особенность расчета на этом этапе состоит в том, что все виды металлошихты пересчитываются случайным образом для каждого химического элемента в определенных пределах. Это обусловлено тем, что точный химический состав металлолома по каждому элементу для разных видов шихтовых материалов неизвестен, кроме таких материалов, как горячебрикетированное железо (ГБЖ) и окатыши, химический состав которых оговаривается условиями контракта на поставляемый вид шихтовых материалов. Например, содержание углерода в передельном чугуна марки ПЛ2 варьируется от 3,4 до 4,5 мас.% [3], поэтому при каждом пересчете значение углерода меняется случайно (от 3,4 до 4,5%), аналогичным образом расчет производится по каждому элементу, входящему в состав чугуна. По этому принципу реализован расчет для готового металлолома (2А,3А и др.), пакетов (9А,10А и др.), брикетов из стружки, литейного чугуна и других видов шихты. В результате есть возможность увидеть склонность выбранных шихтовых материалов к получению незаказной плавки по химии при заданных в методике определенных условиях плавки. Химический состав компонентов металлозавалки можно задавать в таблице и вручную, если необходимо рассчитать плавку по заранее известному химическому составу шихты, без применения случайного распределения.

В методике расчета реализована возможность изменять угары по элементам во время расплавления завалки. Угары элементов во время плавания и окислительного периода можно узнать из технической литературы для конкретного случая расчета. В описываемом примере расчета угары элементов взяты для технологии производства обыкновенных марок сталей в сверхмощных дуговых печах.

В расчете отдельно реализован блок, учитывающий особенности некоторых шихтовых материалов: синтиком, окалина и металлизированные окатыши. Проведены отдельные расчеты для данных материалов металлозавалки.

В расчете окалина представлена окислителем, который отдает свой кислород на окисление при-

месей расплава, в результате чего восстанавливается железо. В отдельной таблице можно изменять соотношение Fe_2O_3 к FeO в окалине. Условно кислород, входящий в Fe_2O_3 , идет на окисление примесей расплава, а FeO переходит в шлак, но и здесь реализована возможность случайного либо ручного распределения оксидов железа между зонами жидкой ванны: расплав, шлак и дымовые газы.

Окатыши пересчитываются исходя из того, что в их состав могут входить оксид кальция и оксид кремния (связующие вещества, флюсы), которые переходят в шлак, уменьшая, тем самым, объем по железу данного вида шихты.

Синтиком представляет собой своеобразный материал, где происходит восстановление оксидов железа примесями основы (чугуна). Особенности этого материала достаточно подробно рассмотрены в [4]. Для этого материала также в методике присутствует отдельная таблица, в которой ведется расчет по материалу в соответствии с физико-химическими особенностями поведения данного материала при расплавлении.

Подключение в общий расчет блока таблиц с расчетами по окалине, окатышам и синтикому осуществляется только в том случае, когда данные материалы вводятся в качестве шихтовых.

Результаты расчета химического состава стали после расплавления завалки, количество затраченного кислорода на окисление примесей сведены в отдельные таблицы. В таблицах пересчитываются данные, по которым определяется количество окисляющихся примесей из шихты, определяются результаты расчета химического состава жидкой стали периода плавания, выполняются расчеты поступления оксидов элементов в шлак и необходимого количества извести в зависимости от задаваемой в методике желаемой основности шлака.

В дальнейшем производится расчет состава шлака периода плавания. Для расчета количества оксидов, входящих в шлак, из футеровки берется значение не в кг/т, а от 15 до 20% от общей массы оксидов, входящих в состав шлака из других источников (металла, неметаллической части шихты, шлакообразующих и т. п.). При использовании чугуна в металлошихту вводится дополнительное количество фосфора, который часто превышает марочное значение, что требует дополнительных мероприятий в процессе выплавки стали: удаление первичного шлака и наведение нового. Это приводит к повышению расхода футеровки из-за увеличения количества шлака и времени плавания. В расчете при превышении допустимого содержания фосфора после расплавления предусмотрен

расчет по второму шлаку. Расход футеровки при душлаковом режиме ведения плавки увеличивается пропорционально увеличению количества вводимых шлакообразующих для наведения второго шлака, поэтому расход футеровки взят в процентах, что не приводит к ошибкам в конечных показателях расчета при использовании в шихте чугуна. Однако расход футеровки можно вводить и в кг/т из практических данных, при этом убрав ограничение по фосфору в марке стали. При добавлении в завалку чугуна методика в таком случае будет считать плавку с одним шлаком, при этом фосфор удалится не в заданных для марки пределах, а только по заданному угару при плавлении. Такой расчет удобен, если необходимо узнать, сколько можно добавить в завалку чугуна, не превышая предела по фосфору для рассчитываемой марки стали.

В методике присутствуют ячейки, в которые вводятся расход науглероживателя для вспенивания шлака и расход электродов. Расход электродов зависит от качества электродов, скорости их окисления и других факторов, в том числе и поломок из-за неправильной шихтовки корзин и эксплуатации, поэтому в расчете эта цифра определяется на основании статистических данных, которые берутся за определенный период работы печи. Расход науглероживателя для вспенивания шлака также задается отдельно для рассчитываемого агрегата либо не задается вообще, если печь работает без вспенивания шлака (без технологии работы на длинных дугах).

Методика рассчитывает остаточное содержание элементов после продувки кислородом жидкой ванны. Конечное содержание углерода после окислительного периода задается случайным образом в пределах, которые оговорены технологическими инструкциями, хром, марганец и сера удаляются в шлак в зависимости от значений, заданных в ячейках для угаров соответствующих элементов во время окислительного периода.

При расчете окислительного периода (продувка ванны кислородом) определяются количество кислорода, затрачиваемого на окисление примесей, и количество оксидов железа во вновь наводимом шлаке. Здесь же определяется, сколько необходимо навести нового шлака для увеличения его основности (отличается от заданной ранее, если в шихте задается неметаллическая часть) или удаления фосфора (если после периода плавления содержание фосфора больше, чем необходимо для рассчитываемой стали). При расчете вновь наводимого шлака задаются следующие значения: основность вновь наводимого шлака, при этом рассчитывается

количество извести; процент содержания оксидов фосфора во вновь наводимом шлаке или способность шлака к удалению фосфора; процент удаления шлака периода плавления (первичного шлака); процент содержания основных оксидов во вновь наводимом шлаке. Результатом расчета окислительного периода плавки является таблица окончательного химического состава шлака и состав стали перед выпуском плавки.

Дальше производится расчет состава и количества печных газов, выделяющихся в процессе плавления и окисления. Если в процессе плавления с «болотом» перед завалкой добавляют кусковой кокс, то при расчете можно вводить количество этого кокса и степень его усвоения. Также вводится степень усвоения углерода из вдуваемого кокса в виде порошка (если используется), кроме того, вводится и степень усвоения углерода из электродов, так как они расходуются во время плавления. Если в печи действует система дожигания CO до CO₂, выполняется расчет системы дожигания, здесь можно устанавливать степень дожигания в специальной ячейке. Если в печи для сокращения расхода электроэнергии используют природный газ, то в методике реализован расчет для определения затрат природного газа. В расчете задаем процент электроэнергии, который необходимо сэкономить при использовании газа. Если природный газ не используем, то в соответствующей ячейке таблицы задаем 0. По химическому составу природного газа методика рассчитывает теплотворную способность газа и коэффициент расхода воздуха для полного сжигания газа. Для окисления примесей металла и дожигания CO до CO₂ может использоваться технический кислород и воздух, поэтому в таблице в ячейке задается процент воздуха, участвующего в данных процессах. После расчета состава дымовых газов получаем материальный баланс плавки.

Для определения энергозатрат методика считает тепловой баланс плавки, который состоит из приходных и расходных статей. В данной методике не учитывается расход тепла через футеровку печи, он взят теоретический для ДСП-100, но эту часть расчета планируется реализовать в ближайшее время. Реализован расчет расхода тепла через рабочее окно и свод печи излучением при их открытии (рабочие операции продувки, завалка, подвалка, заправка печи) и с охлаждающей водой и др. Основной задачей расчета теплового баланса является нахождение количества тепла, которое необходимо внести электрическими дугами.

Тепловой баланс представляется отдельным блоком, где следует задать данные для его расчета.

В ячейках, связанных с приходом тепла от «болота», указываем, какой процент стали и шлака оставляем от предыдущей плавки (количество «болота»), если плавка не первая. Для первой плавки расчета по «болоту» нет, для второй плавки в качестве шихтового материала в таблицу, где рассчитывается завалка, добавляется жидкая сталь, оставленная на подине печи с химическим составом, который соответствует полупродукту предыдущей плавки. Для расчета теплового баланса можно изменять следующие данные: температуру стали после расплавления, скрытую теплоту плавления (от 240 до 285 кДж/кг), теплоемкость жидкой стали (от 0,65 до 0,85 кДж/(кг·°C)), теплоемкость твердой стали, которая зависит от количества углерода в завалке и рассчитывается исходя из того, что завалке с содержанием 0,25 % углерода соответствует значение 0,6 кДж/(кг·°C), завалке с содержанием углерода от 0,25–0,6% – 0,65, завалке с содержанием углерода выше 0,6% – 0,7 кДж/(кг·°C); теплоемкость шлака (от 1,5 до 2 кДж/(кг·°C)), температура шлака в процессе плавки принята на 50 °C выше температуры стали после расплавления (изменяемый параметр можно поставить интересные значения); электрический КПД в пределах 0,85–0,95; тепловой КПД принят в пределах 0,75–0,85 и некоторые другие значения, которые можно взять из технической литературы и справочников.

После ввода всех данных методика приводит результаты расчета количества тепла, уносимое дымовыми газами, затраты электроэнергии на плавку и других статей баланса приходной и расходной

частей. После этого идет расчет времени плавки, времени плавки под током и производительности печи (вводим мощность трансформатора, коэффициент мощности $\cos \varphi$, коэффициент использования мощности, время на технологические операции, время простоев (горячие простои, ремонты) печи за год).

Дальше в соответствии с методикой осуществляется расчет обработки стали на установке доводки стали, где производится доводка стали до нужного химического состава, перемешивание стали инертным газом. В этом отдельном блоке рассчитываются количества ферросплавов, химический состав шлака, расход футеровки ковша, количество алюминия для раскисления стали.

Результатами расчетов являются таблицы химического состава стали после ввода ферросплавов и раскислителей, материальный баланс.

Для внепечной обработки применяются различные расчеты, сведенные в отдельный блок таблиц. Так, для расчета раскисляющей смеси задаем ее состав, количество смеси на плавку вводится в отдельную ячейку из технологической карты для рассчитываемой марки стали; для расчета теплоизолирующей шлаковой смеси вводятся ее состав и расход на 1 т стали; вводятся также значения угара кремния, алюминия и марганца за время обработки на печь-ковше из технической литературы либо из практических наблюдений и анализов, в зависимости от угара элементов рассчитывается количество ферросплавов для корректировки химического состава стали.

Т а б л и ц а 1. Окончательный материальный баланс плавки

Израсходовано	кг	Получено	кг
Углеродистый лом	125000	Жидкий металл	113101,73
Известь	3067,89	Шлак	9311,04
Кокс для вспенивания шлака	1423,86	Газы	18520,06
Электроды	282,5	Потери железа в дым	3255,59
Воздух	12943,44	Металл и шлак, оставляемый для формирования «болота»	7157,11
Технический кислород	5240,16		
Природный газ	354,48		
Футеровка печи	701,31		
Шамотный бой	141,011		
FeSiMn 17	804,44		
FeSi 65	282,27		
Науглероживатель (кокс)	190,75		
SiCa	35,02		
Алюминий	41,5		
Футеровка ковша	89,7		
ТШС (CaO: CaF ₂) (шлаковая смесь)	678,49		
Аргон	30,29		
Раскисляющая смесь	90,46		
Всего	151397,63		151345,56
Невязка, %	0,034		52,08

Методика ведет расчет количества серы, которое удалится в процессе обработки стали рафинировочным шлаком на печь-ковше в зависимости от количества и состава вводимых шлакообразующих, и расчет количества вводимой силикокальциевой проволоки для удаления неметаллических включений из стали и модифицирования.

Отдельно проводятся расчеты газов, выделяющихся при обработке стали на печь-ковше, падения температуры стали в зависимости от времени обработки, потерь температуры от ввода дополнительных ферросплавов и другие показатели, по которым затем определяются затраты электроэнергии на агрегате печь-ковш [5]. В конце расчета методика выводит таблицы с окончательным материальным балансом плавки и химическим составом стали. Примеры разных расчетов при помощи методики приведены в табл. 1–3.

Как видно из табл. 1, расчетная плавка отличается от практической, однако порядок величин сопоставим. Таким образом, методика позволяет быстро рассчитать множество показателей электроплавки, по которым можно анализировать целесообразность использования того или иного шихтового

Т а б л и ц а 2. Состав металла к концу обработки на печь-ковше

Элемент	кг	%
Углерод	204,51	0,181
Кремний	250,42	0,221
Марганец	587,81	0,52
Фосфор	12,57	0,011
Сера	19,82	0,017
Никель	286,7	0,254
Медь	323,44	0,286
Хром	132,24	0,117
Алюминий	3,39	0,003
Кислород	3,01	0,0026
Железо	111198,46	98,386
Всего стали	113022,48	100

вого материала в завалке, просчитать затраты на плавку в денежном выражении. В расчеты всегда можно ввести новые данные и формулы, тем самым, обогащая и улучшая возможности данной методики. На практике и в инженерной работе методика является инструментом для быстрого теоретического расчета материального и теплового баланса печи и печи-ковша.

Т а б л и ц а 3. Сравнение расчетных и практических данных, смоделированных под ДСП-1

Сравниваемые значения	Расчет по методике для СтЗсп (общая средняя температура шихты 20°C)	Расчет* по методике для СтЗсп с использованием в шихте 30 т жидкого чугуна	Практические данные СтЗсп
Шихтовые материалы, в том числе:	125000	125000	125000
Лом категории А (объединенный), кг	100300	95000	100300
Лом категории А пакетированный (объединенный), кг	25000	0	25000
Чугун жидкий, кг	0	30000	0
Расход электроэнергии на ДСП, кВт·ч	49567	44921	49466
Расход электроэнергии на ПК, кВт·ч	2351	2201	1040
Общее время плавки, мин	59	55	57
Общее время плавки под током, мин	48	44	47
Длительность обработки на ПК, мин	20	20	20
Химический состав готовой стали, мас. %	C-0,17; Si-0,23; Mn-0,56; P-0,01; S-0,017; Cr-0,11; Ni-0,19; Cu-0,23; Al-0,014	C-0,17; Si-0,23; Mn-0,56; P-0,016; S-0,009; Cr-0,13; Ni-0,1; Cu-0,21; Al-0,014	C-0,17; Si-0,22; Mn-0,56; P-0,008; S-0,023; Cr-0,077; Ni-0,096; Cu-0,23; Al-0,014
Известь, кг	5576	10063	5084
Расход FeSiMn 17, кг	1160	951	825
Расход FeSi 65, кг	155	37	0
Расход Al, кг	37	37	36
Расход SiCa, кг	37	36	69
Расход природного газа, м ³	528	528	551
Расход углеродсодержащих материалов, кг	520	0	635
Расход кислорода, м ³	3155	4574,2	3005
Выход жидкого металла, кг	113300	111000	112600
Количество корзин, шт.	2	2	2
Температура выпуска, °C	1649	1649	1649
Температура в конце обработки на ПК, °C	1566	1566	1566
Расход аргона, кг	19	19	18

* Массовая доля фосфора в чугуне 0,08; общая средняя температура шихты 315 °C.

Литература

1. Е д н е р а л Ф. П. Расчеты по электрометаллургии сталей и ферросплавов / Ф. П. Еднерал, А. Ф. Филиппов. Изд. 2-е справ. и доп. – М.: ГНТ издательство литературы по черной и цветной металлургии. 1962. – 230 с.
2. Е г о р о в А. В. Расчет мощности и параметров электропечей черной металлургии: Учеб. пособ. для вузов. М.: Металлургия, 1990.
3. ГОСТ 805–95. Чугун передельный. Технические условия.
4. Перспективы развития производства и использования композиционного материала «Синтиком» в сталеплавильном производстве / Г. А. Дорофеев, А. Г. Воробьев // Черные металлы. 2002. С. 12–16.
5. Д ю д к и н Д. А., Б а т ь С. Ю., Г р и н б е р г С. Е., М а р и н ц е в С. Н. Производство стали на агрегате ковш-печь / Под науч. ред. Д. А. Дюдкина. Донецк ООО «Юго-Восток, Лтд», 2003.