

13. П о с т о л ь н и к Ю. С. К расчету температур и времени нагрева массивных тел при противоточном теплообмене // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1990. — № 6. — С. 84–86.

14. П о с т о л ь н и к Ю. С., О г у р ц о в А. П. Сопоставительный анализ двух математических моделей теплообмена массивных тел в противотоке // Математическое моделирование. — 2000. — № 1(4). — С. 29–30.

15. М а т е м а т и ч е с к а я модель нагрева массивных тел в теоретическом противотоке / Ю. С. Постольник, А. П. Огурцов, В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова // Математичне моделювання. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2000. — № 2(5). — С. 87–91.

16. Л ы к о в А. В. Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1970. — № 5. — С. 109–150.

17. К а в а д е р о в А. В., С а м о й л о в и ч Ю. А. Закономерности нагрева пластины и цилиндра одновременно излучением и конвекцией // Нагрев металла и работа нагревательных печей: Сб. науч. тр. ВНИИМТ. — Свердловск, 1960. — № 6. — С. 44–58.

Представлена кафедрой
металлургических технологий БГПА

Поступила 1.04.2001

УДК 669.187

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ 100-ТОННОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ № 3 РУП «БЕЛОРУССКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»

Инж. ФИЛИППОВ В. В.

Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»

Докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И., инж. ФОМЕНКО С. А.

Белорусская государственная политехническая академия

Экспериментальное определение энергетических характеристик дуговых сталеплавильных печей (ДСП) имеет первостепенное значение для выбора рациональных режимов работы, организации эксплуатации оборудования, принятия основных технических решений по совершенствованию технологии выплавки стали. Для определения энергетических характеристик необходимо проведение балансовых испытаний с полным контролем теплотехнических и технологических параметров процесса плавки, по результатам которой составляется полный энергетический баланс.

Кордовые и высококачественные марки стали в условиях Белорусского металлургического завода выплавляются в сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП № 3 с последующей доводкой на установках внепечной обработки металла (установка «печь–ковш», вакууматор RH или VD) и разливкой на машине непрерывного литья заготовок сечением 250×300 и 300×400 мм.

Электродуговая сталеплавильная печь № 3 Белорусского металлургического завода введена в эксплуатацию по проекту фирмы «Фест-Альпине» в 1989 г. В 1998 г. по контракту с этой же фирмой проведена ее модернизация. Печь оборудована трансформатором с номинальной мощностью 75 МВ·А, а также оснащена системой эркерного выпуска

металла, донной продувкой металла инертными газами, тремя стеновыми и дверной газокислородными горелками. Продувка металла кислородом осуществляется через водоохлаждаемую непогружную фурму «Magk-4» с интенсивностью 1800–2400 м³/ч и через эркерную комбинированную фурму с интенсивностью 1200–1500 м³/ч. Одновременно с продувкой металла кислородом в печь дуются порошкообразные углеродсодержащие материалы для наведения пенистого шлака.

Большое влияние на динамику нагрева и плавления шихты, энерготехнологические параметры и качество стали при выплавке кордовых марок сталей оказывает шихтовка. За время эксплуатации ДСП № 3 применялись следующие варианты технологии производства кордовой стали:

с использованием 85–100 % металлизированных окатышей;

с частичным использованием металлизированных окатышей (не более 50 %);

без использования металлизированных окатышей на 100 % лома.

В настоящее время шихтовка с использованием 85–100 % металлизированных окатышей не применяется. Практически все плавки кордового назначения шихтуются с частичным использованием металлизированных окатышей.

Для проведения анализа энергетических и технологических показателей работы ДСП № 3 были осуществлены балансовые плавки. Их целью явилось составление материального и энергетического балансов плавки, определение расходов энергоносителей используемых материалов в зависимости от шихтовки плавки кордового назначения и плавки легированных углеродистых сталей. Шихтовки балансовых плавки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Шихтовка балансовых плавки кордового назначения

Кордовые плавки						
Номер плавки	30316	30317	30319	30287	30284	30285
Марка стали	70К	70К	70К	70КЧЛ	70КЧЛ	70КЧЛ
Окатыши, кг	39400	40400	37300	—	5000	1200
Углеродистый лом, кг	—	—	—	19800	20000	20050
Пакеты «ВАЗ», кг	54700	54850	54950	70000	70250	70200
Передельн. чугун, кг	19850	19650	19450	20050	19950	20050
ВСЕГО	113950	114900	111700	109850	115200	111500
Плавки легированных углеродистых сталей						
Номер плавки	30320			30321		
Марка стали	60С2А			60С2А		
Углеродистый лом, кг	110000			84800		
Передельн. чугун, кг	5000			5150		
Пакеты «ВАЗ», кг	—			15100		
ВСЕГО	115000			105050		

* Все балансовые плавки выполнялись по современной технологии: с завалкой на «болото», донной продувкой ванны металла аргоном, продувкой кислородом через фурму-манипулятор и эркерную комбиниро-

ванную фурму, применением газокислородных горелок и с использованием пенистых шлаков.

Основные энерготехнологические параметры плавки показаны в табл. 2.

Таблица 2

Основные энерготехнологические параметры балансовых плавки

Номер плавки	30316	30317	30319	30285	30287	30284	30320	30321
Время под током, мин.	53	57	56	54	56	48	52	48
Время от включения печи до выпуска, мин.	64	64	63	69	71	62	71	57
Общее время плавки, мин.	69	99	72	102	91	70	84	82
Расход электроэнергии, кВт·ч	51626	54693	54248	53512	54745	48605	50869	47683
Удельный расход электроэнергии на 1 т жидкой стали, кВт·ч/т	452,9	476,1	485,74	479,85	498,36	421,91	442,34	453,9
Удельный расход электроэнергии на 1 т годной стали, кВт·ч/т	489,81	521,88	493,17	535,12	516,46	471,89	482,63	467,48
Выход годного, т	105	105	110	100	106	103	105	102
Кислород, м ³ :								
фурма-манипулятор	792	928	769	1062	724	633	534	744
комбинированная фурма	484	546	493	—	—	—	—	—
дверная горелка	376	407	233	437	428	477	537	464
стенные горелки	946	925	988	1090	611	1191	1350	1089
ВСЕГО	2598	2806	2483	2589	1763	2301	2421	2297
Природный газ, м ³ :								
комбинированная фурма	18	21	12	—	—	—	—	—
дверная горелка	188	205	120	220	216	240	270	233
стенные горелки	490	427	513	537	321	601	697	565
ВСЕГО	696	698	645	793	537	841	967	798

Для всех плавки составлены графики энерготехнологических режимов. На рис. 1 приведен график энерготехнологического режима выплавки легированной углеродистой стали (плавка № 30321), на котором показаны динамика подачи активной электроэнергии и продувки ванны аргоном, изменение температуры и содержания элементов расплава металла. Также обозначены периоды работы дверной (ДГ) и стеновых (СГ) горелок (периоды А и Б), период продувки металла кислородом через фурму-манипулятор (ФМ) (период В) и подача всех присадочных материалов.

По результатам балансовых плавки составлены материальные балансы расхода материалов, на основании которых выполнен полный расчет энергетических балансов. Расчет производился с помощью программы «Математическая модель выплавки стали в мощных ДСП», разработанной КНПЛ «Проблемы металлургического производства» БГПА совместно с РУП «Белорусский металлургический завод». Модель включает расчет динамики нагрева и плавления шихты, полный расчет материального и энергетического балансов и расчет потребного количества кислорода для поддержания заданной температуры стали в период ее кипа при отключенных дугах в течение заданного промежутка времени. При расчете возможен качественный и количественный анализ приход-

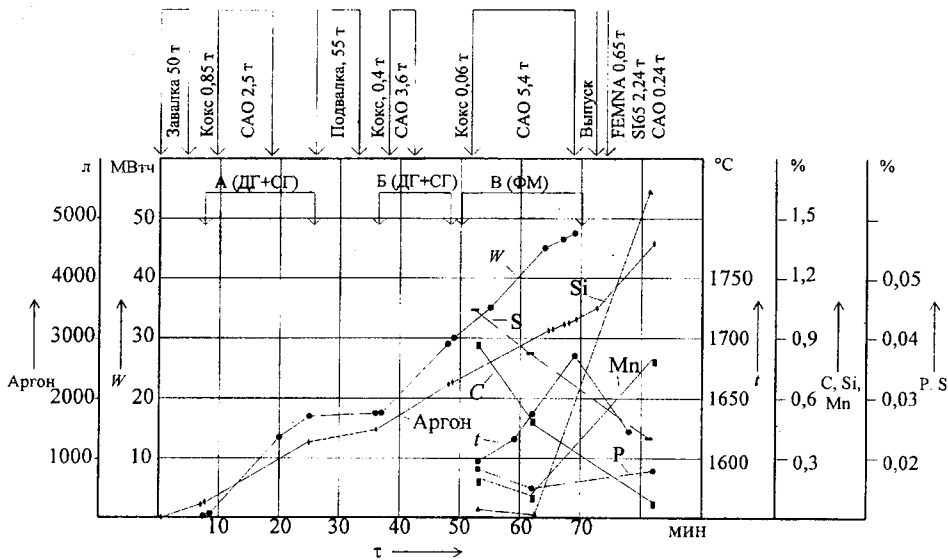


Рис. 1

ных и расходных статей при изменении состава шихты, и, следовательно, анализ топливо- и энергопотребления при выплавке стали.

Результаты расчетов энергетических балансов для кордовых плавок сведены в табл. 3, а для легированных углеродистых плавок — в табл. 4.

Таблица 3

Энергетические балансы от включения печи до выпуска балансовых плавок кордового назначения

Статья баланса	Номер плавки					
	30316		30317		30319	
	ГДж	% (отн.)	ГДж	% (отн.)	ГДж	% (отн.)
ПРИХОД ТЕПЛОТЫ:						
вносимой шихтой	1,05	0,38	1,06	0,39	1,03	0,38
вносимой электрическими дугами	169,27	62,12	173,74	64,35	168,75	62,66
топливных горелок	23,27	8,71	24,43	9,05	22,58	8,38
экзотермических реакций	44,99	16,51	38,63	14,31	45,21	16,79
шлакообразования	4,15	1,52	4,29	1,59	3,90	1,45
вносимой «болотом»	29,31	10,76	27,84	10,31	27,84	10,34
ИТОГО	272,50	10,76	269,99	100	269,84	10,34
РАСХОД ТЕПЛОТЫ:						
физической теплоты стали	153,15	56,20	154,13	57,09	152,56	56,65
физической теплоты стали, теряемой со шлаком	0,74	0,27	0,74	0,28	0,74	0,28
физической теплоты шлака	46,20	16,96	41,92	15,53	44,76	16,62
уходящих газов	29,34	10,77	30,12	11,16	28,71	10,66
уносимой частицами Fe ₂ O ₃	7,04	2,58	7,04	2,61	7,04	2,62
охлаждаемой воды	33,42	12,27	33,42	12,39	32,9	12,22
Потери через наружную поверхность	1,07	0,39	1,07	0,40	1,05	0,39

Статья баланса	Номер плавки					
	30316		30317		30319	
	ГДж	% (отн.)	ГДж	% (отн.)	ГДж	% (отн.)
Потери открытой печью	1,52	0,56	1,52	0,56	1,52	0,56
ИТОГО	272,50	100	269,99	100	269,30	100
Расчетный расход электро- энергии, кВт·ч	52245		53623		52667	
Невязка расчетного и производ- ственного расхода электро- энергии, %	1,2		2,0		2,9	
Тепловой КПД	0,702		0,698		0,705	
Общий КПД	0,632		0,628		0,627	
	30284		30285		30287	
ПРИХОД ТЕПЛОТЫ:						
вносимой шихтой	1,06	0,4	1,02	0,38	1,02	0,39
вносимой электрическими ду- гами	161,86	60,79	169,02	63,10	174,24	66,61
топливных горелок	29,44	11,05	27,76	10,36	18,80	7,19
экзотермических реакций	45,17	16,96	40,28	15,04	37,73	14,42
шлакообразования	0,9	0,34	0,48	0,18	0,48	0,18
вносимой «болотом»	27,84	10,46	29,31	10,49	29,31	11,20
ИТОГО	266,27	100	267,87	100	261,58	100
РАСХОД ТЕПЛОТЫ:						
физической теплоты стали	152,68	57,34	153,81	57,42	154,14	58,93
физической теплоты стали, те- ряемой со шлаком	0,74	0,28	0,74	0,28	0,74	0,28
физической теплоты шлака	37,93	14,24	37,45	13,98	37,05	14,17
уходящих газов	32,93	12,37	30,10	11,24	22,81	8,72
уносимой частицами Fe ₂ O ₃	7,04	2,65	7,04	2,63	7,04	2,69
охлаждаемой воды	32,39	12,16	36,04	13,45	37,08	14,81
Потери через наружную по- верхность	1,49	0,39	1,16	0,43	1,19	0,45
Потери открытой печью	1,52	0,58	1,52	0,57	1,52	0,58
ИТОГО	266,27	100	267,87	100	261,58	100
Расчетный расход электро- энергии, кВт·ч	49957		52166		53778	
Невязка расчетного и производ- ственного расхода электро- энергии, %	2,7		2,6		1,8	
Тепловой КПД	0,686		0,682		0,700	
Общий КПД	0,617		0,614		0,630	

**Энергетические балансы от включения печи до выпуска балансовых плавков
качественных высокоуглеродистых сталей**

Статья баланса	Номер плавки			
	30321		30320	
	ГДж	% (отн.)	ГДж	% (отн.)
ПРИХОД ТЕПЛОТЫ:				
вносимой шихтой	0,97	0,37	1,06	0,39
вносимой электрическими дугами	161,65	61,89	162,99	59,46
топливных горелок	27,93	10,69	33,85	12,35
экзотермических реакций	40,91	15,66	45,93	16,67
шлакообразования	0,43	0,16	0,98	0,36
вносимой «болотом»	29,31	11,22	29,31	10,69
ИТОГО	261,31	100	274,12	100
РАСХОД ТЕПЛОТЫ:				
физической теплоты стали	153,37	58,72	153,00	55,82
физической теплоты стали, теряемой со шлаком	0,74	0,29	0,74	0,27
физической теплоты шлака	38,69	14,82	39,53	14,42
уходящих газов	29,08	11,14	34,01	12,41
уносимой частицами Fe ₂ O ₃	7,04	2,70	7,04	2,57
охлаждаемой воды и открытое рабочее окно	29,77	11,41	37,08	13,53
Потери через наружную поверхность	0,96	0,37	1,19	0,46
Потери открытой пещью	1,52	0,58	1,52	0,55
ИТОГО	261,18	0,58	274,12	100
Расход электроэнергии расчетный, кВт·ч	48806		50305	
Невязка расчетного и производственного расхода электроэнергии, %	2,3		1,2	
Тепловой КПД	0,705		0,670	
Общий КПД	0,649		0,605	

Анализ полученных данных показывает, что основными источниками энергии являются: электроэнергия – 59,8...66,6 % и теплота экзотермических реакций – 14,3...18,8 %.

Из расчетов видно, что разбежка расчетных значений расхода электроэнергии и производственных данных составляет 1,2...2,9 %, что является приемлемым при теплотехнических расчетах.

Процесс выплавки охарактеризовался широким диапазоном нестабильности затрат энергии на расплавление и нагрев металла и показал, что затраты энергии на плавках кордового назначения выше затрат энергии на плавки легированных углеродистых сталей:

на кордовых плавках с завалкой 40 % окатышей – 51626...54693 кВт·ч;

на кордовых плавках с завалкой не более 5 % окатышей – 48605...54745 кВт·ч;

на плавках легированных углеродистых сталей – 47683...50869 кВт·ч.

Широкий диапазон нестабильности прежде всего объясняется различной массой (105...115 т) и составом шихтовки, а также разным вре-

менем плавления и нагрева (время от включения до выпуска составило 57...71 мин.).

Статья прихода теплоты химических реакций в основном определяется скоростью реакций углерода в жидкой ванне печи с подводимым к нему окислителем. Суммарный приход теплоты от экзотермических реакций окисления углерода, марганца, кремния, алюминия и железа составил:

на кордовых плавках с завалкой 40 % окатышей – 14,31...16,79 %;

на кордовых плавках с завалкой не более 5 % окатышей – 14,42...16,96 %;

на качественных высокоуглеродистых плавках – 15,66...16,76 %.

При выплавке кордовой стали (15,67 %) приход теплоты химических реакций в среднем несколько ниже, чем при выплавке легированных углеродистых сталей (16,21 %).

Использование дверной и стеновых газоокислородных горелок обеспечивает дополнительные 18,8...33,8 МДж (7,2...12,3 %) энергии, что приводит к интенсификации процесса плавления шихты и соответственно позволяет сократить период плавления и расход электроэнергии.

Существенное повышение производительности ДСП происходит при завалке металлошихты на «болота». Во всех случаях масса «болота» была 19...20 тонн. Приход теплоты за счет «болота» составил порядка 11 % от ее общего прихода.

При рассмотрении расходных частей энергетического баланса видно, что полезная энергия, идущая на нагрев и плавление металла, составляет 55,5...58,93 %.

Основными статьями потерь расходной части баланса являются: теплота шлака, теплота охлаждающей воды, теплота уходящих газов.

Величина физической теплоты шлака зависит от количества вводимых в печь присадочных шлакообразующих материалов и физической теплоты шлака «болота», оставленного от предыдущей плавки. Величина потерь теплоты со шлаком составляет 14,17...17,35 %, при этом значение этих потерь для кордовых плавков с использованием в шихте 40 % (в среднем 16,37 %) окатышей выше по сравнению с кордовыми плавками без использования окатышей (14,13 %) и плавков легированных углеродистых сталей (14,62 %).

Потери теплоты с охлаждающей водой прежде всего зависят от времени плавки (от включения печи до выпуска) и составляют 11,41...14,81 %.

Величина потерь с уходящими газами состоит из потерь теплоты с газообразными продуктами реакций и уходящими газами процесса горения природного газа и находится в пределах 8,72...12,41 %.

В заключение следует отметить, что по результатам балансовых плавков составлены их материальные и энергетические балансы, разработана методика и определены составляющие в приходной и расходной частях баланса. Это позволяет оценить технологическую и энергетическую эффективность выплавки.