



УДК 669.187.58.001.2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННОГО ЖИДКОФАЗНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА

М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Д. М. Жиров,
Г. А. Мельник, М. С. Приходько, А. А. Ждановский

Определены вольт-амперные характеристики и градиенты напряжения дуг в условиях плазменного жидкофазного восстановления железа. Выявлены зависимости температуры шлакометаллического расплава от ряда факторов. Предложены и оптимизированы удельные энергетические, геометрические и технологические параметры плавильных реакторов на базе ДСП и РВП для плазменного жидкофазного восстановления железа.

The volt-ampere characteristics and gradients of voltage of arcs in the conditions of plasma liquid-phase reduction of iron were determined. Dependences of slag-metal melt temperature on some factors were revealed. Specific power, geometrical and technological parameters of melting reactors on the basis of arc steel-making and ore-smelting furnaces for plasma liquid-phase reduction of iron are suggested and optimized.

Ключевые слова: восстановление железа; вольт-амперная характеристика; градиент напряжения; температура расплава; энергетический баланс; удельные энергетические и геометрические параметры печей

Разработка технологии и установок для плазменного восстановления железа невозможна без расчета электрических характеристик дуг и энергетических параметров установки в целом, необходимых для обеспечения надежной плавки шихтовых материалов с требуемой скоростью, формирования расплавленной ванны жидкого металла и шлака, протекания процессов восстановления, достижения нужной температуры зоны металлургических реакций.

Напряжение на дуге в процессе выплавки металла зависит от многих факторов: состава газов, в которых горит дуга, тока, длины дуги и т. д. В зависимости от диапазона изменений напряжений дуги в тот или другой период выбирают напряжение холостого хода источника питания и наклон его внешней вольт-амперной характеристики (ВАХ). Удельные энергетические показатели зависят от геометрических параметров плавильной зоны, расположения электродов, плотности тока на поверхности ванны.

Цель данной работы заключалась в исследовании ВАХ и градиента напряжения дуг в режиме плазмен-

ного жидкофазного восстановления железа, а также в определении тепловых параметров процесса.

Энергетические параметры исследовали в условиях плазменного жидкофазного восстановления железа из окисленных окатышей на лабораторной установке, описанной в работе [1]. На рис. 1 показана принципиальная схема электроснабжения установки. Электропитание установки осуществляется от сети переменного тока напряжением 380 В через дроссель насыщения и разделительный трансформатор с регулируемым напряжением холостого хода. Значение тока регулируется дросселем насыщения А 1474 в пределах 600... 3000 А, напряжение холостого хода достигает 576 В, крутизна ВАХ составляет не менее 0,025 В/А.

Экспериментальные ВАХ в пусковом (аргон в качестве плазмообразующего газа) и рабочем режимах (пропан-бутан и его смесь с воздухом) представлены на рис. 2, 3. Как видно из рисунков, они являются слабо возрастающими, их наклон в пусковом режиме (аргон) составляет $(0,2... 0,7) \cdot 10^{-2}$, в рабочем (пропан-бутан) — $(0,5... 2,0) \cdot 10^{-2}$ и $(0,4... 1,6) \cdot 10^{-2}$ В/А (пропан-бутан-воздушная смесь). Большой наклон ВАХ и более высокий общий уровень напряжения дуги (пропан-бутан или его смесь с воздухом), по сравнению с работой на аргоне,

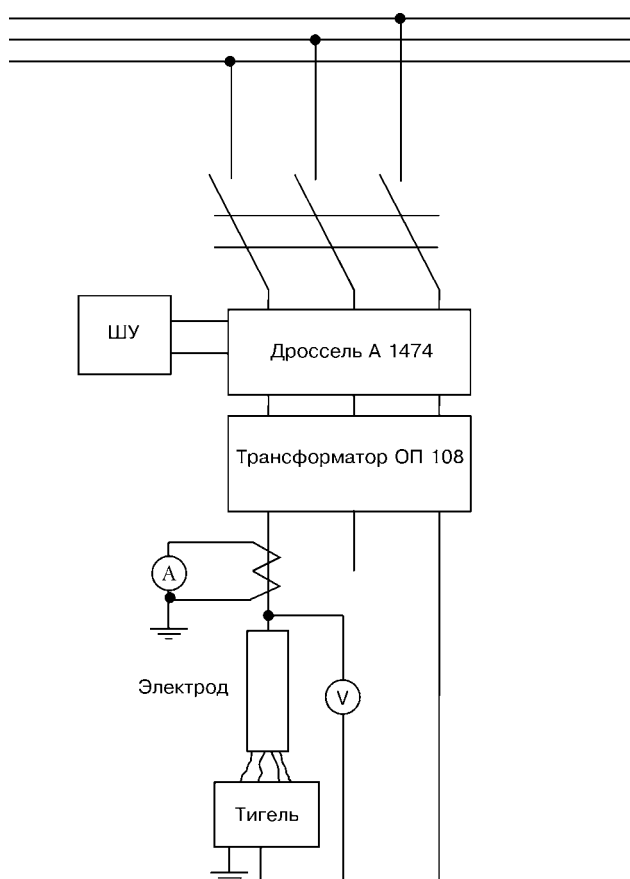


Рис. 1. Принципиальная схема электроснабжения установки: ШУ — шкаф управления

объясняются значительными затратами энергии на диссоциацию и ионизацию многоатомных газов.

Градиент напряжения плазменной дуги при работе в пусковом режиме на аргоне составляет примерно 4, в рабочем режиме на пропан-бутане 15 и на пропан-бутан-воздушной смеси 12 В/см (рис. 4). С увеличением тока градиент растет незначительно. Большой градиент при использовании в качестве плазмообразующего газа пропан-бутана, по сравнению с аргонем, можно объяснить, как и для ВАХ, более значительными затратами энергии на диссоциацию и ионизацию многоатомных газов.

В результате проведенных исследований установлено, что ВАХ плазменной дуги в условиях плазменного жидкофазного восстановления железа опи-

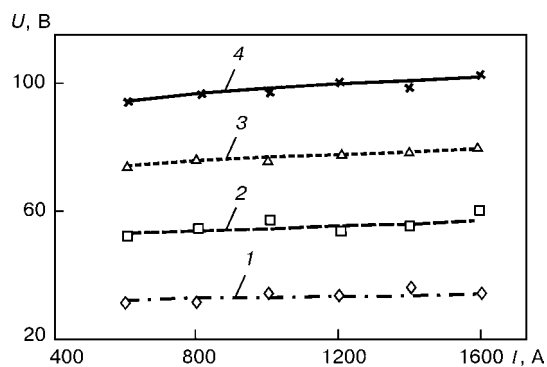


Рис. 2. ВАХ плазменной дуги в пусковом режиме на аргоне при различных значениях длины дуги, см: 1 — 5; 2 — 10; 3 — 15; 4 — 20

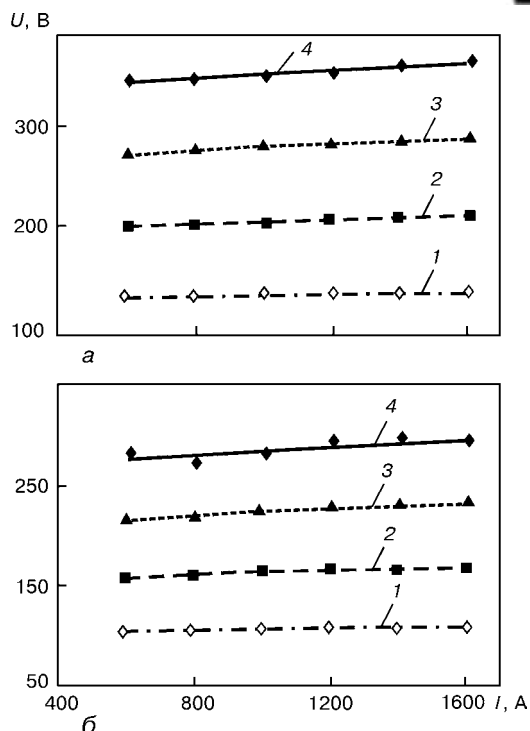


Рис. 3. ВАХ плазменной дуги в рабочем режиме на пропан-бутане (а) и пропан-бутан-воздушной смеси (б) при различных значениях длины дуги; обозн. поз. 1–4 см. на рис. 2

сываются эмпирической зависимостью для дуг трехфазной группы плазматронов или плазменно-дуговых нагревателей других типов (например с полыми графитированными электродами) [2], которая при использовании аргона в качестве плазмообразующего газа имеет следующий вид:

$$U_{\text{длг}} = 1,1[(b I_{\text{д}}^m L_{\text{д}}) + L_{\text{э}} E_{\text{с}} + 10], \quad (1)$$

где $U_{\text{длг}}$ — падение напряжение на дуге при работе на аргоне; b — коэффициент, равный 1,65... 1,70; $I_{\text{д}}$ — ток дуги, А; m — показатель степени, равный 0,065... 0,072; $L_{\text{д}}$ — длина дуги, см; $L_{\text{э}}$ — заглубление электрода в сопло, мм; $E_{\text{с}}$ — градиент напряжения части столба дуги, находящейся в сопловом канале, В/мм.

Для расчета ВАХ в пусковом режиме общий вид уравнения (1) остается неизменным, но значения

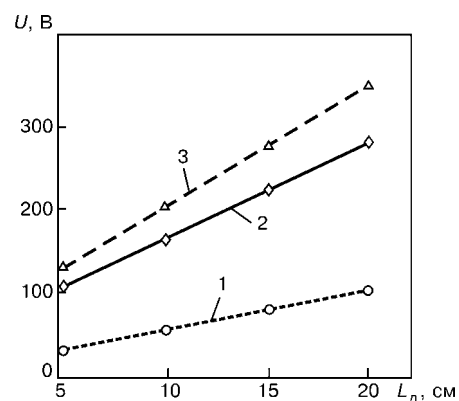


Рис. 4. Градиент напряжения плазменной дуги при токе 1000 А: 1 — в пусковом режиме на аргоне; 2 — в рабочем режиме на пропан-бутан-воздушной смеси; 3 — в рабочем режиме на пропан-бутане

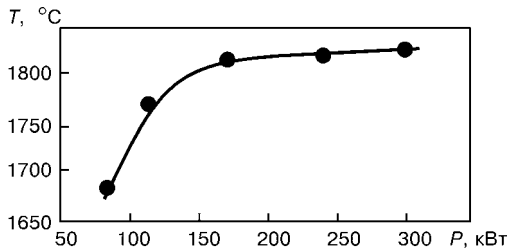


Рис. 5. Зависимость температуры T шлакометаллического расплава от мощности дуги P при ее длине 7 см

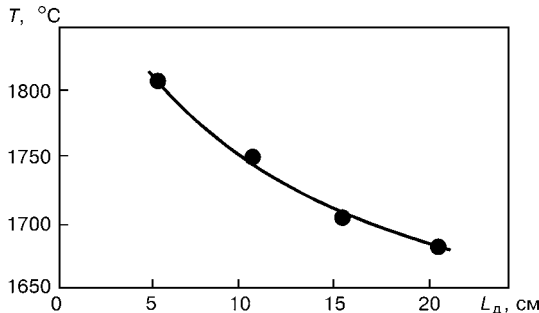


Рис. 6. Зависимость температуры шлакометаллического расплава от длины дуги ($P = 130$ кВт)

некоторых коэффициентов в этом случае следует принимать такими: $b = 1,75... 2,2$; $m = 0,075... 0,085$.

В работе [2] отмечено, что при использовании смеси газов напряжение на дуге $U_{д,см}$ рассчитывается по формуле

$$U_{д,см} = U_{дЛГ} [10^2 \Gamma]^n, \quad (2)$$

где Γ — объемная доля газа в смеси его с аргонном; n — показатель степени, зависящий от вида газа.

В результате проведенных экспериментов установлено, что для пропан-бутана значение n равняется 0,35, а для его смеси с воздухом — 0,32.

Исследовано влияние ряда факторов на температуру шлакометаллического расплава. Температуру измеряли вольфрам-рениевой термонарой. Для

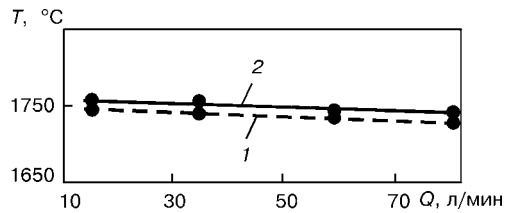


Рис. 7. Зависимость температуры шлакометаллического расплава от расхода Q пропан-бутана при мощности дуги 100 (1) и 150 (2) кВт

этого в полученном ранее слитке параллельно оси на расстоянии 0,5 его радиуса (50 мм) просверлили отверстие, через которое снизу ввели термонару до уровня поверхности. Массу загруженных железорудных окатышей распределили таким образом, чтобы в расплавленном состоянии слой шлака составлял около 7 мм.

На рис. 5 показана зависимость температуры шлакометаллического расплава от мощности дуги при ее длине 7 см, резко возрастающая при увеличении мощности от 70 до 150 кВт, а затем растущая довольно медленно, что, очевидно, объясняется испарением шлакометаллического расплава при большой температуре.

Определено влияние на температуру расплава длины дуги при неизменной мощности 130 кВт (рис. 6). Причиной снижения температуры расплава при увеличении длины, является повышение тепловых потерь из столба дуги путем излучения.

Влияние расхода плазмообразующего газа (пропан-бутан) на температуру шлакометаллического расплава в исследуемом диапазоне ощущается слабо, хотя четко прослеживается ее снижение при увеличении его расхода (рис. 7). Очевидно, при больших расходах газ не успевает прогреться в столбе дуги до достаточно высокой температуры, что вы-

Статья баланса	Водоохлаждаемый кристаллизатор			Графитовый тигель
	длина дуги 5 см, мощность 100 кВт	длина дуги 5 см, мощность 200 кВт	длина дуги 20 см, мощность 200 кВт	длина дуги 5 см, мощность 100 кВт
Нагрев и плавление шихты (КПД)	27	17,5	12	43
Нагрев тигля, затравки, электрода	15	19,0	23	29
Потери с охлаждающей водой	51	55,0	55	15
Потери с отходящим газом	1	1,5	2	3
Потери с нагретых поверхностей в окружающую среду	6	7,0	8	10

Примечание. Приход энергии составляет 100 %.

Параметры	Рекомендуемые	Расчетные	
		ДСП-6	ДСП-50
Максимальная плотность тока в сечении электрода, А/см ²	13,8... 20,0	14	17,3
Удельная мощность на поверхности пода, кВт/м ²	700... 1000	670	800
Удельная активная мощность на площади распада электродов, кВт/м ²	2500... 4400	3180	6250
Плотность тока на поверхности ванны, А/м ²	6000... 9000	6900	6250
Отношение диаметра пода к диаметру электрода	7,4... 10,0	7,43	9,12
Отношение диаметра распада электродов к диаметру электрода	3,00... 3,12	3,33	3,2
Отношение диаметра пода к диаметру распада электродов	2,50... 2,85	2,23	2,85



Предполагаемые технологические параметры плавильных реакторов для жидкофазного восстановления железа

	ДСП-6	ДСП-50
Ток дуги, А	4200... 5600	15000... 21600
Напряжение на дуге, В	150... 200	200... 290
Напряжение холостого хода трансформатора, В	220... 281	300... 407
Рабочая мощность печи, кВт	2500... 2600	12500... 13000
Диаметр электрода, мм	300	500
Диаметр полости в электроде, мм	40	75

зывает некоторое снижение температуры шлакометаллического расплава.

Составлен энергетический баланс процесса при протекании его в различных условиях. Потери теплоты в водоохлаждаемых панелях и кристаллизаторе определяли способом калориметрирования. Температуру отходящих из реакционного пространства газов, электрода и графитового тигля измеряли вольфрам-рениевой термопарой. Потери тепла от нагретых поверхностей в окружающее пространство определяли по выражениям, приведенным в работе [3]. Распределение энергии по статьям показано в табл. 1.

Следует отметить, что при плавке в графитовом тигле при равных тепловложениях полезная энергия, расходуемая на нагрев и плавление шихты, значительно больше, чем при плавке в водоохлаждаемом кристаллизаторе. Это объясняется меньшими потерями с охлаждающей водой при одинаковой мощности дуги. Таким образом, увеличение вкладываемой электрической мощности и длины дуги приводит к уменьшению КПД, что согласуется с данными о влиянии этих факторов на температуру шлакометаллического расплава.

Анализ результатов, полученных в промышленных условиях на дуговой сталеплавильной печи ДСП 6Н2 и рудовосстановительной печи типа РКЗ 1,2, а также описанных в работах [4–7], позволил

определить такие обобщенные удельные энергетические и геометрические параметры для расчета агрегатов плазменного жидкофазного восстановления железа, использование которых обеспечивает сокращение затрат электроэнергии и увеличение выхода готового продукта (табл. 2). Кроме того, здесь представлены сравнительные расчетные значения удельных параметров на базе плавильных реакторов ДСП-6 и ДСП-50 применительно к плазменному жидкофазному восстановлению железа с учетом использования отходящих газов для предварительного твердофазного восстановления.

Выводы

1. Установлено, что ВАХ плазменной дуги в условиях плазменного жидкофазного восстановления железа описываются установленной ранее эмпирической зависимостью для дуг трехфазной группы плазменно-дуговых нагревателей с уточненными коэффициентами для случаев использования пропан-бутана и его смеси с воздухом.
2. Получены технико-экономические параметры для расчета реакторов плазменного жидкофазного восстановления.
3. Показана возможность использования ДСП и РВП в качестве реакторов плазменного жидкофазного восстановления железа.

1. *Плазменное жидкофазное восстановление железа из его оксидов с применением газообразных восстановителей* / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник, Д. М. Жиров и др. // Современ. электрометаллургия. — 2006. — № 2. — С. 20–24.
2. *Инженерная методика расчета основных энергетических параметров плазменных ковшей-печей* / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник и др. // Там же. — 2004. — № 3. — С. 33–36.
3. *Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н.* Энергетический баланс дуговых сталеплавильных печей. — М.: Энергия, 1973. — 88 с.
4. *Гасик М. И., Лякишев Н. П., Емлин Б. И.* Теория и технология производства ферросплавов. — М.: Металлургия, 1988. — 320 с.
5. *Егоров А. В.* Расчет мощности и параметров электрических печей черной металлургии. — М.: Металлургия, 1990. — 280 с.
6. *Никольский Л. Е., Смоляренко В. Д., Кузнецов Л. Н.* Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. — М.: Металлургия, 1981. — 320 с.
7. *Емлин Б. И., Гасик М. И.* Справочник по электротермическим процессам. — М.: Металлургия, 1978. — 288 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 21.06.2007