



УДК 669.187.2 -982.537.56/.57

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗАЦИИ НА ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТУ КАПЕЛЬНЫХ ЗАМЫКАНИЙ ПРИ ВАКУУМНОМ ДУГОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

**В. Г. Лисиенко, Я. А. Насыров, М. И. Климов,
П. С. Альтман, А. Ю. Ташкинов, А. Е. Гончаров**

В промышленных условиях проведен эксперимент по вакуумному дуговому переплаву электрода диаметром 380 мм из легированной стали в кристаллизатор диаметром 465 мм. Разработана статистическая модель изменения падения напряжения на дуге в зависимости от длительности релаксационного периода ионизации. Предложенная модель может использоваться для оптимального управления процессом вакуумного дугового переплава.

Experiment on vacuum arc remelting of 380 mm diameter electrode of alloy steel into 465 mm diameter mould was performed in the industrial conditions. Static model of changing voltage drop at arc depending on duration of relaxation period of ionization has been developed. The offered model can be used for optimum control of process of vacuum arc remelting.

Ключевые слова: ионизация; межэлектродный промежуток; падение напряжения; частота капельных замыканий

Введение

Ионизацией при плавке условно называют сложный комплекс явлений, состоящий из непосредственно ионизации и возбуждения паров или газов в зазоре между электродом (катодом) и ванной жидкого металла (анодом) [1]. Ионизация происходит при испарении и конденсации низкокипящих примесей и легирующих добавок магния, хлористого магния, марганца и т. д. Основная часть светящегося облака имеет зеленовато-голубой цвет, который ближе к «короне» слитка меняется на желтый и красный. Свечение может иметь вид выраженного шлейфа и следовать за анодным пятном, скользящим по траектории. Свечение может быть кратковременным, 1...5 с, отрываясь от дуги и самостоятельно высвечивая промежуток между электродом и изложницей, а может быть продолжительным, 5...100 с, скрывая под своим ярким пятном зеркало расплавленного металла и нижний торец электрода.

Основная цель работы — провести анализ ионизации и определить ее влияние на параметры падения напряжения на дуге и частоту капельных замыканий во время плавки.

Экспериментальная часть и обсуждение

При проведении плавки падение напряжения на дуге U_d и частоту капельных замыканий $F_{к.з.}$ регистрировали на промышленном компьютере AWS-800 фирмы «Advantech» с частотой 1 Гц. Все данные усредняли по пяти предшествующим точкам. Давление в печи поддерживали на уровне 2 Па, межэлектродный промежуток — 15 ± 5 мм во всем периоде плавки, ток дуги — 6 кА. На рис. 1 показаны зависимости падения напряжения на дуге и частоты

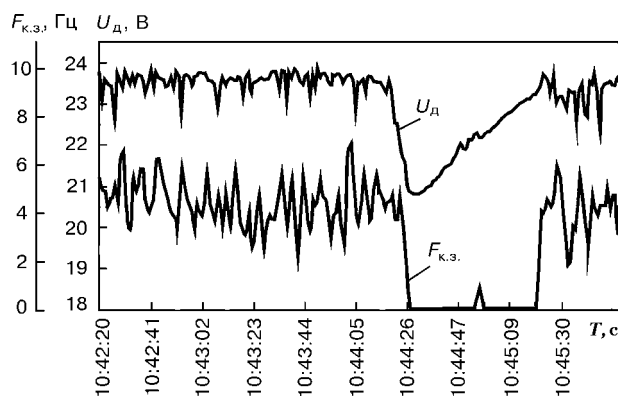


Рис. 1. Зависимость падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий от времени

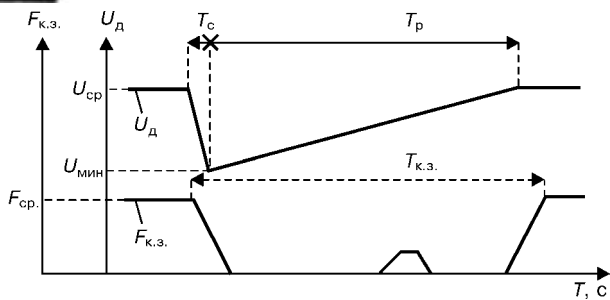


Рис. 2. Графическая модель ионизации при вакуумном дуговом переплаве

капельных замыканий от времени при переплаве в кристаллизаторе диаметром 465 мм электрода диаметром 380 мм из высоколегированной стали.

При ионизации происходит снижение падения напряжения на дуге на 1... 5 В и уменьшение частоты капельных замыканий вплоть до ее отсутствия [2, 3]. В связи с этим решили проанализировать наиболее характерные процессы ионизации в течение всего периода плавки. Использовали 15 различных диаграмм ионизаций. Каждая диаграмма отличалась средним падением напряжения на дуге до ионизации $U_{ср}$, минимальным падением напряжения во время ионизации $U_{мин}$, разницей между падением напряжения на дуге до ионизации и ее минимальным значением $U_{разн}$, а также усредненной частотой капельных замыканий $F_{ср}$ до ионизации.

Каждая ионизация определяется следующими параметрами: временем спада напряжения T_c , временем релаксационного процесса падения напряжения T_p , временем, при котором значение частоты капельных замыканий близко к нулю $T_{к.з.}$. В итоге была предложена графическая модель поведения ионизации, представленная на рис. 2. В таблице приведены данные по каждой ионизации во время плавления.

Параметры падения напряжения на дуге и частоты капельных замыканий для каждой ионизации

№ ионизации	$U_{мин}$, В	$U_{разн}$, В	T_c , с	T_p , с	$T_{к.з.}$, с
1	19,9	3,6	3,0	80	73
2	21,1	2,4	2,0	40	34
3	20,7	2,8	3,0	45	41
4	21,6	1,9	5,0	49	43
5	21,5	2,0	4,5	50	44
6	22,0	1,5	4,0	20	15
7	22,0	1,5	3,0	16	11
8	20,3	3,2	6,0	70	62
9	21,0	2,5	4,0	54	47
10	21,2	2,3	3,0	42	35
11	20,9	2,6	7,0	60	55
12	21,1	2,4	3,0	47	44
13	21,0	2,4	4,0	38	31
14	21,2	2,3	2,0	30	24
15	21,7	1,8	2,0	25	19

Примечание. $U_{ср}$ для всех диаграмм ионизации составляет 23,5 В.

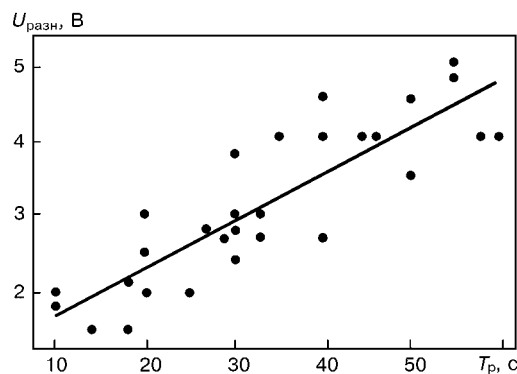


Рис. 3. Зависимость $U_{разн}$ от длительности релаксационного процесса ионизации: точки — данные экспериментов; сплошная линия — предсказание по уравнению (1)

Используя пакет Statistica 5.1, провели анализ зависимости величины $U_{разн}$ от длительности релаксационного процесса T_p . Зависимость хорошо аппроксимируется следующим линейным уравнением:

$$U_{разн} = 0,028 T_p + 1,046. \quad (1)$$

Коэффициент регрессии для данной модели равен 0,778, что говорит о том, что модель достаточно хорошо описывает полученные данные эксперимента. На рис. 3 показано распределение $U_{разн}$ в зависимости от длительности релаксационного процесса T_p , а на рис. 4 — диаграмма рассеивания зависимости экспериментальных данных от предсказанных значений $U_{разн}$ по уравнению (1).

Кроме того, провели анализ остатков, т. е. определили разность значений $U_{разн}$, предсказанных по уравнению (1) и полученных экспериментально. На рис. 5 показан график нормированной функции распределения остатков.

Из рис. 4, 5 можно сделать вывод об адекватности предложенного регрессионного уравнения (1). Таким образом, по изменению параметра $U_{разн}$ можно с высокой долей вероятности сделать предположение о длительности ионизации и времени ее окончания. Характерной особенностью ионизации является прекращение капельных замыканий во

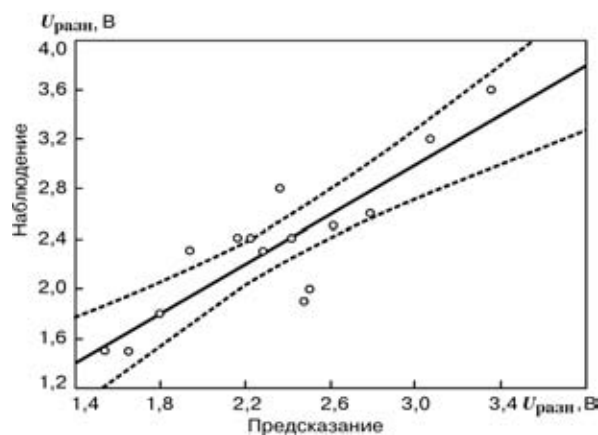


Рис. 4. Диаграмма рассеивания зависимости наблюдаемых (экспериментальных) данных от предсказанных по уравнению (1). Сплошная линия представляет собой зависимость по уравнению (1), пунктиром показан 95 %-ный интервал относительно линии регрессии

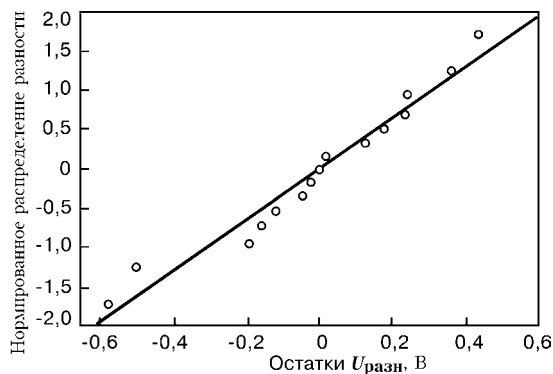


Рис. 5. График нормированной функции распределения остатков. Сплошная линия — функция распределения; точки — значения остатков

время релаксационного процесса. В течение периода ионизации $F_{к.з.}$ равна нулю, и только в некоторых случаях возникают так называемые «шумы»: каплющий металл с торца электрода приводит к короткому замыканию с ванной жидкого металла. Частота этих «шумов» имеет порядок 1...2 Гц, продолжительность не более 3...5 с и ее легко отличить, исходя из того, что частота капельных замыканий до ионизации составляет 6...8 Гц и более.

Применение модели при управлении ВДП

Работа автоматизированных регулирующих систем вакуумного дугового переплава выполняется, как правило, либо по параметрам падения напряжения, либо по частоте капельных замыканий [4]. При длительной (затяжной) ионизации, т. е. падении напряжения и отсутствии частоты капельных замыканий, возможно ухудшение работы автоматических регуляторов, а следствием этого может быть нестабильность управления процессом плавки.

В соответствии с предложенной регрессионной моделью имеется возможность идентифицировать ионизацию как явление и с учетом заданной модели оптимально управлять процессом плавления.

Выводы

1. Падение напряжения на дуге при вакуумном дуговом способе переплава резко скачкообразно уменьшается, при этом длительность релаксационного периода медленно возрастает до первоначального значения.
2. Зависимость скачкообразного изменения падения напряжения от длительности релаксационного процесса хорошо описывается линейной моделью.
3. Частота капельных замыканий во время релаксационного процесса ионизации практически прекращается и ее уровень составляет 0,5... 1,5 Гц.
4. Предложенная регрессионная модель может использоваться в автоматических регуляторах плавки для управления движением плавящегося электрода.

1. Плавка и литье титановых сплавов // А. Л. Андреев, Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар и др. — М.: Металлургия, 1994. — 386 с.
2. Вакуумный дуговой переплав сплава Inconel 718 // Ф. Д. Заннер, Р. Л. Уильямсон, Р. П. Гаррисон и др. // Журнал Общества специалистов по минералам и металлам. — 1997. — Сер. В, т. 28. — С. 841–853.
3. Современные стратегии контроля вакуумного дугового переплава чувствительных к ликвации сплавов // Ф. Д. Заннер, М. Э. Склинджер, К. Л. Хайсинджер, Д. Д. Бимен // Журнал Общества специалистов по минералам и металлам. — 1991. — Сер. В, т. 94. — С. 37–46.
4. Альперович М. Е. Автоматизация и оптимизация основных процессов спецэлектротехнологии. — М.: Металлургия, 1990. — 176 с.

Верхнесалдинское металлургическое
производственное объединение
Поступила 22.04.2002



ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА ЖУРНАЛЫ ИЭС ИМ. Е.О. ПАТОНА:

«Современная электрометаллургия»
4 выпуска в год, подписной индекс 70693, тел.: (044) 269 26 23, 268 34 84,
(с 1985 по 2002 гг. журнал издавался под названием «Проблемы специальной электрометаллургии»);

«Автоматическая сварка»
12 выпусков в год, подписной индекс 70031, тел.: (044) 227 63 02, 269 26 23;

«Техническая диагностика и неразрушающий контроль»
4 выпуска в год, подписной индекс 74475, тел.: (044) 261 58 81, 269 26 23;

«The Paton Welding Journal»
перевод на английский язык журнала «Автоматическая сварка»,
12 выпусков в год, подписной индекс 21971, тел.: (044) 269 26 23, 227 63 02;

«Advances in Electrometallurgy»
перевод на английский язык журнала «Современная электрометаллургия»
4 выпуска в год, тел.: (044) 269 26 23, 268 34 84

Подписка в Украине по каталогам агентств:
«Пресса» ♦ «Идея» - тел.: (044) 568 5715 ♦ «KSS» - тел.: (044) 464 0220 ♦ «САММИТ» - тел.: (044) 254 5050

Подписка в Российской Федерации по каталогу агентства «Роспечать»
Подписка через редакции журналов на годовые комплекты,
отдельные выпуски и статьи, в т.ч. в электронном виде (600 dpi, *.pdf формат)

<http://www.nas.gov.ua/pwj>