

УДК 537.523.5:621.791.75

МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ПРОЦЕССОВ
В АНОДНОЙ ОБЛАСТИ СВАРОЧНОЙ ДУГИ С «ХОЛОДНЫМ» КАТОДОМ
ПРИ НОРМАЛЬНОМ ДАВЛЕНИИ

А. И. ЛЯПИН

Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

При дуговой сварке прямой полярности состояние анода (свариваемой детали) во многом определяет качество сварного шва и конструкции в целом. Поэтому знание элементарных процессов в анодной области имеет практическое значение. На сегодняшний день не существует законченной теории анодной области сварочной дуги с «холодным» катодом. Здесь можно отметить работы по моделированию свойств сварочной дуги с «горячим» катодом [1, 2]. Затруднение в развитии теории в основном связано с выбором механизма генерации заряженных частиц и, как следствие, отсутствием общепризнанной модели элементарных процессов.

Одним из условий стационарности дуги является повсеместная компенсация объемных зарядов противоположного знака в столбе. Для такой компенсации необходимо, чтобы концентрации зарядов противоположных знаков были равны между собой. В этом случае в разрядном промежутке и, в частности, в анодной области, должны протекать электронный и ионный токи. В катодной области электронный ток связан с эмиссией электронов из катода, а ионный ток возникает в результате ионизации пара электронами, получившими энергию от поля катодного падения потенциала (полевая ионизация).

Общепризнанным является факт наличия анодного падения потенциала. «Холодный» анод не эмитирует заряженные частицы. Электрическое поле анода вытягивает электроны из положительного столба, обеспечивая разрядный ток. Неопределенность связана с механизмом возникновения ионов в анодной области. В настоящее время рассматриваются два механизма генерации ионов – термическая и полевая ионизации. Предполагается [3], что в маломощных дугах реализуется полевая, а в мощных термическая ионизации.

В теории, основанной на термической ионизации, распределение потенциала и знак анодного падения потенциала может зависеть от разрядного тока, потенциала и площади анода [1]. В этом случае ионы и электроны рождаются в некоторой высокотемпературной области, расположенной на определенном расстоянии от анода. Возникшие ионы двигаются в сторону катода, а электроны, ускоряемые полем анодного падения потенциала, бомбардируют анод, отдавая ему полученную энергию $e \cdot U_a$. При этом в ионизационной области и в конце столба со стороны анода концентрация ионов будет равна половине концентрации электронов. Действительно, при ионизации электронным ударом, независимо от механизма ионизации, образуются три заряженные частицы: положительный ион и два электрона – вызвавший ионизацию и возникший в результате ионизации. В то же время согласно

расчетам ионный ток на всех участках столба составляет примерно тысячную часть от тока дуги. Для разрешения этой ситуации приходится дополнительно рассматривать механизмы, приводящие к уменьшению концентрации ионов в рассматриваемой области.

В [4, 5] подробно обсуждены особенности указанных выше механизмов ионизации и сделан выбор в пользу полевой ионизации. В этой модели электроны положительного столба ускоряются полем анодного падения потенциала и, сталкиваясь с испаряющимися атомами анода, ионизируют их. Протяженность анодной области, в которой происходит падение анодного потенциала U_a , составляет несколько длин свободного пробега. Поэтому энергия, приобретаемая электроном на каждом свободном пробеге, может составлять только часть энергии $e \cdot U_a$, которая меньше энергии ионизации атомов пара. Следовательно, в данном случае речь может идти о ступенчатой ионизации. Так как вероятность ступенчатой ионизации пропорциональна квадрату тока [6], то при сварочных токах такая ионизация вполне вероятна. Следует отметить, что после ионизации на анод попадают два электрона с разными энергиями. Энергия электрона, вызвавшего ионизацию, примерно равна работе выхода из анода. Энергия электрона, возникающего в результате ионизации, примерно равна энергии ионизации атома пара. Впрочем, концентрации таких электронов должны составлять лишь тысячную долю концентрации первичных электронов. Таким образом, рассмотренная модель позволяет с единых позиций описать явления в катодной и анодной областях.

Здесь рассмотрены основные элементарные процессы. Возможное уточнение модели будет сделано после расчета баланса энергии на аноде.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кривцун, И. В.** Анодные процессы в сварочных дугах / И. В. Кривцун // Автоматическая сварка. – 2018. – № 11–12. – С. 103–117.
2. **Baeva, M.** Novel non-equilibrium modelling of a DC electric arc in argon / M. Baeva, M. S. Benilov, N. A. Almeida // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2016. – Vol. 49. – P. 1–16.
3. Теория сварочных процессов: учебник / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л. Макаров [и др.]; под ред. В. М. Неровного. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с. : ил.
4. **Ляпин, А. И.** Обобщенная модель элементарных процессов в области «холодного» катода сварочной дуги в парах при атмосферном давлении / А. И. Ляпин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2024. – № 1 (82). – С. 108–117.
5. **Ляпин, А. И.** Баланс энергии в катодной области и на «холодном» катоде сварочной дуги, свободно горящей при атмосферном давлении / А. И. Ляпин // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2025. – № 1 (86). – С. 81–91.
6. **Энгель, А.** Физика и техника электрического разряда в газах: в 2 т. / А. Энгель, М. Штенбек. – М. : ОНТИ, 1935. – Т. 1. – 252 с.