

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ

Г.С.Кандилян, В.Г. Каролинский, М.И. Сазонов, В.Л. Хуснутдинова

### ВВЕДЕНИЕ

Плазменная резка находит все более широкое применение в различных отраслях промышленности, что обуславливается возможностью ее использования для резки с высокой производительностью и точностью как черных, так и цветных металлов и их сплавов. В настоящее время накоплен определенный опыт применения плазменной резки. Вместе с тем в имеющейся литературе по плазменной резке ограничены работы по изучению физических и тепловых процессов, происходящих при резке металлов. При резке плазменной дугой имеется три источника тепла, а именно: подвижное пятно дуги, столб дуги и струя плазмы. Каждый из них вносит свою долю тепла по всей высоте реза.

В данной работе предложена секционированная модель реза и проведены исследования формирования плазменной дуги и распределения усредненной плотности плазменной дуги и распределения усредненной плотности тока и тепловых потоков вдоль полости реза.

### 1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка состоит из серийно выпускаемого плазмотрона, систем питания электроэнергией, рабочим газом — воздухом и охлаждающей водой, секционированной модели реза и систем измерения распределения тепловых потерь и токов плазменной дуги вдоль полуцели, моделирующей рез в листовом металле (рис. 1).

В экспериментах использовался плазмотрон со сменными соплами с внутренним диаметром 3,5; 4,0; 5,0 мм. Расход воздуха через плазмотрон составлял 1,0 — 4,0 г/с. Воздух подавался в дуговую камеру с закруткой с целью стабилизации дуги в пространстве на оси плазмотрона. Эксперименты проводились при прямой полярности подключения плазмотрона к источнику электропитания, когда внутренний электрод плазмотрона служил катодом, а секционированная модель — анодом.

В качестве модели полости реза использовался набор из медных охлаждаемых водой секций. Каждая секция диаметром 100 мм и толщиной 9,5 мм имела выфрезерованную щель от центра секции по образующей, причем ширина щели была выбрана равной 8 мм, характерной при резке металлов большой толщины. Секции при помощи

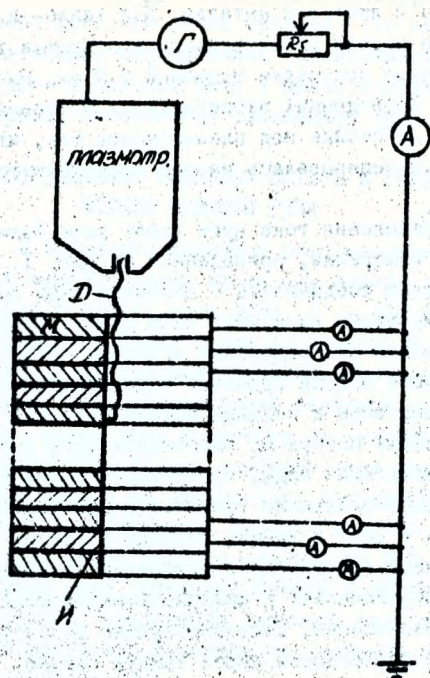


Рис. 1 Электрическая схема питания плазматрона и системы электроизмерений; И - секция модели полости реза;  $R_g$  - балластное сопротивление; Г - источник электропитания постоянного тока; И - тепло- и электроизоляция; D - электрическая дуга.

стяжных болтов соединялись так, что их щели образовали единую полость, моделирующую рез в листовом металле. Для тепло- и электроизоляции между секциями модели устанавливались покрытые термостойким лаком стекловолоконные прокладки толщиной 0,2 мм. Высота секционированной модели в проведенных экспериментах составляла 107 мм. Модель устанавливалась на стойке под плазмостроном так, что образующая сопла плазмострона проецировалась на оси полуокружности щели и секции.

Для изучения распределения тока дуги вдоль реза была применена электрическая схема измерений, приведенная на рис. 1. Каждая секция модели электрически соединялась с положительным полюсом источника электропитания через амперметр типа Ц-4311 класса точности 0,5. Для исследования распределения тепловых потоков вдоль полости реза каждая секция модели отдельно охлаждалась потоком воды. Индивидуальный подвод воды к секциям модели позволял провести калориметрирование тепловых потерь от плазменной дуги и струи. Разность температур охлаждающей воды, протекающей через каждую секцию, измерялась дифференциальными транзисторными термодатчиками, которые погружались в воду в линиях подвода и отвода воды для каждой секции. Каждая пара транзисторов включалась в мостовую схему измерений, которая подключалась к информационно-измерительной системе типа К-200/4. Напряжения, соответствующие разности температур охлаждающей воды, протекающей через каждую секцию, последовательно подавались на цифropечатающее устройство для последующей обработки данных.

Следует отметить, что предложенная модель полости реза в некоторой степени отличается от реального реза в листовом металле, производимого при помощи плазмострона. Отличие заключается в том, что при резке в области взаимодействия плазменной дуги с металлом происходит его расплавление и испарение, а также вынос расплавленного металла потоком плазмы из полости реза. Условия горения дуги, установления ее средней длины при резке металла могут отличаться от условий горения в полости разработанной модели. Для выявления этих особенностей были проведены исследования вольт-амперных характеристик дуги при использовании секционированной модели. Результаты экспериментов были сравнены с вольт-амперными характеристиками дуги полученными непосредственно при резке металла. Сравнение вольт-амперных характеристик в исследованных диапазонах тока дуги и расхода рабочего газа показало, что их вид и величины напряжений при соответствующих токах отличаются незначительно. Это положение позволяет заключить, что условия горения дуги в секционированной модели



горения дуги в секционированной модели приближенно те же, что и условия горения дуги при резке металла. Тем не менее необходимы дальнейшие детальные исследования газодинамики и процессов установления длины дуги в полости реза с целью изыскания способов увеличения прорезывающей способности плазменной дуги.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ И ТОКА ДУГИ ВДОЛЬ МОДЕЛИ ПОЛОСТИ РЕЗА

На рис. 2 приведено типичное распределение тепловых потерь, приходящих на единицу длины вдоль оси модели полости реза при различных расходах воздуха, токе дуги  $I = 140$  А, диаметре сопла  $d_c = 4$  мм и расстоянии от среза сопла до модели  $l = 12$  мм. Координаты секций отнесены к их среднему сечению. Как видно из рисунка, при расходе воздуха 1 г/с максимальный тепловой поток приходится на первую секцию, далее вниз по потоку он экспоненциально уменьшается. При увеличении расхода рабочего газа через плазматрон до 2 г/с тепловые потери на первых двух секциях стали сравнимыми, а тепловые потоки в последующих секциях вниз по потоку газа уменьшаются. При увеличении расхода воздуха до 2,5 г/с тепловые потери во вторую секцию даже превышают потери в первую секцию.

Таким образом, увеличение рабочего газа через плазматрон позволяет перераспределить характер теплообмена плазменной дугой и металлом в полости реза.

На рис. 3 приведены распределения тепловых потерь при токах дуги 60–160 А при диаметре сопла 4 мм и расстоянии от реза сопла до модели 12,0 мм. Из полученных данных следует, что с ростом тока от 60 А до 160 А тепловые потери в среднем в первые и последние секции возрастают в 2–2,7 раза. Таким образом, увеличение тока дуги и ее мощности приводит к увеличению прорезывающей способности плазматрона.

Изучение распределения тепловых потерь вдоль полости реза при различных диаметрах сопла и расстояниях плазматрона до модели показали, что при изменении диаметра сопла от 3,5 мм до 5 мм и расстояния  $l$  от 12,0 мм до 20 мм тепловые потоки вдоль полости реза изменяются пренебрежимо мало. Тем не менее следует отметить, что уменьшение диаметра сопла и расстояния  $l$  плазматрона до модели приводит к слабому возрастанию тепловых потерь во всех сечениях реза и, следовательно, к улучшению прорезывающей способности плазматрона.

Для изучения поведения дуги в полости реза были проведены измерения распределения тока дуги вдоль реза. На рис. 4 приведены характерные усредненные на единицу длины токи в секции в зависи-

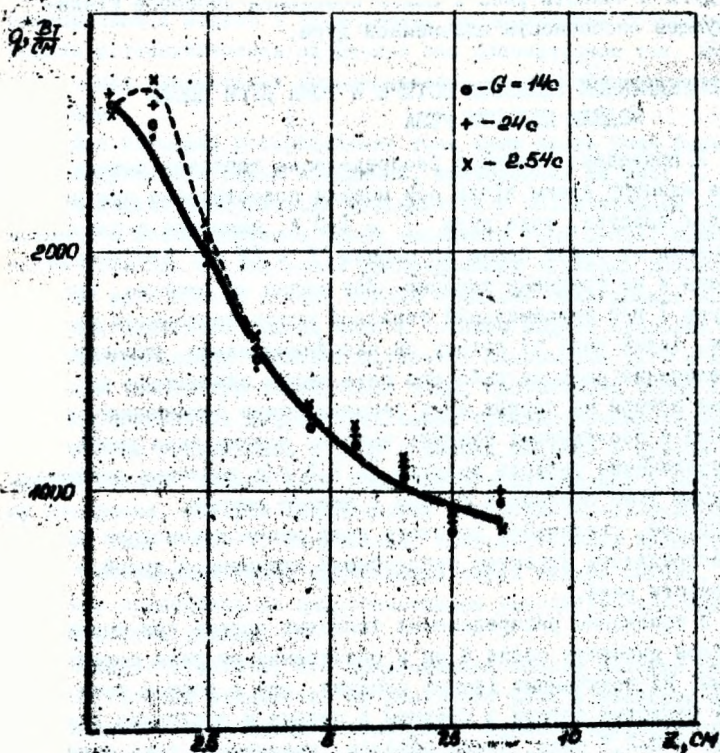


Рис. 2. Распределение тепловых потерь вдоль реза при различных расходах воздуха.  $l = 140 \text{ A}$ ,  $d_2 = 4 \text{ мм}$ ,  $l = 12 \text{ мм}$ .

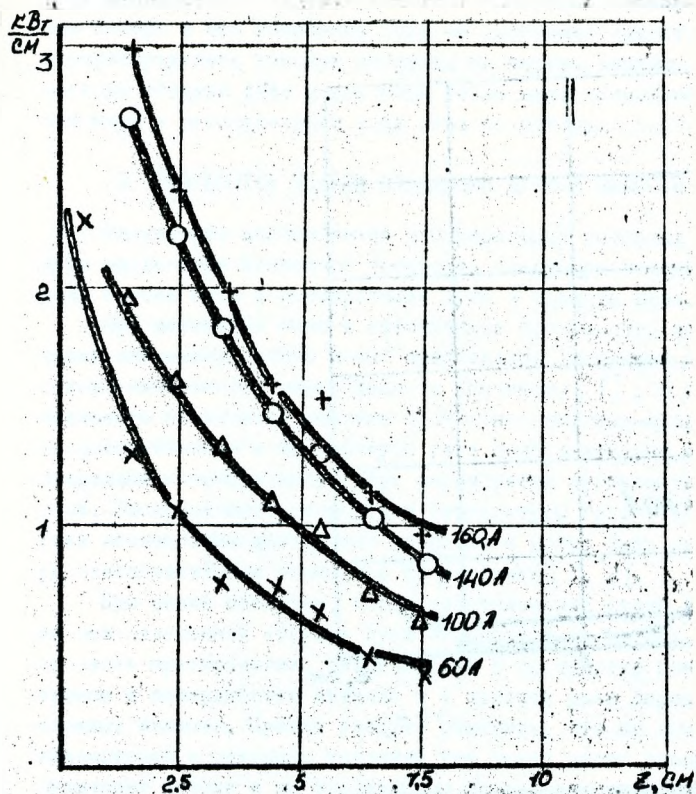


Рис. 3 Распределение тепловых потоков вдоль полости реза при различных токах,  
 $G = 1,5$  г/с,  $d_c = 4$  мм,  $l = 12$  мм.



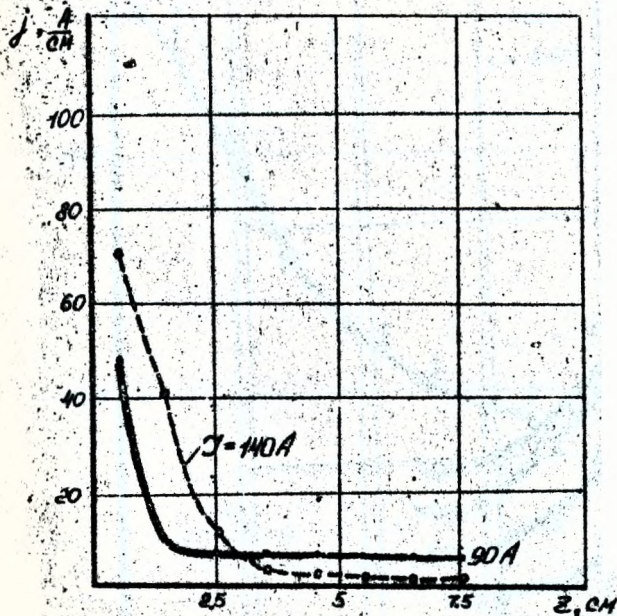


Рис. 4 Распределение усредненной плотности тока дуги вдоль реза при различных токах.

$$G = 2 \text{ г/с}, d_c = 4 \text{ мм}, l = 12 \text{ мм}$$

мости от расстояния вдоль полости реза при токе дуги 90 и 140 А, диаметре сопла 5 мм, расстоянии плазмотрона от металла 12,0 мм и расходе воздуха 1,3 г/с. Из полученных результатов следует, что распределение тока дуги вдоль реза аналогично распределению тепловых потерь и что изменение тока не позволяет существенным образом перераспределить токовую нагрузку на первую секцию. Изменение расхода воздуха даже в два раза также дает возможность сместить максимум в распределении тока вниз по потоку.

### 3. РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ПОВЕДЕНИЯ ДУГИ В ПОЛОСТИ РЕЗА

Результаты исследования распределений тепловых потерь и тока дуги вдоль реза позволяют построить следующую газодинамическую модель потока газа и формирования дуги в полости реза.

При истечении газа в затопленное пространство из сопла плазмотрона плазменную струю можно представить состоящей из трех участков: начального, переходного и основного [1]. В области потенциального начального участка протяженностью семь-девять калибров скорость течения и температура газа приблизительно постоянны. За пределами потенциального ядра формируется турбулентный пограничный слой. Распределения скорости и температуры газа в основном участке исследованы достаточно подробно и могут быть рассчитаны с удовлетворительной точностью по методике [1, 2].

При резке металлов, когда электрический столб дуги горит на оси плазменной струи и дуга замыкается на металл в результате процесса шунтирования, течение газа в просвете между плазмотроном и поверхностью металла и в полости реза определяется рядом сложных явлений. Прежде следует отметить, что на выходе сопла плазмотрона в реальных условиях уже имеет место значительная турбулизация потока и по проведенным исследованиям степень турбулентности на начальном участке составляет 11-14 %, что определяется условиями подачи газа в плазмотрон. Это приводит к тому, что в потенциальном ядре имеют место значительные пульсации и неравномерное распределение скорости потока. Кроме того, присутствие дуги на оси плазменной струи приводит к значительным градиентам температуры газа на этом начальном участке течения.

Результаты проведенных исследований распределения тепловых потерь и тока дуги вдоль реза позволяют построить следующую картину течения газа в процессе плазменной резки. При оптимальном расстоянии плазмотрона до поверхности разрезаемого металла, которое составляет 10-14 мм, начальный участок струи входит в поло-



сть реза. Это положение основывается на результатах проведенных исследований, которые показывают, что полученные распределения тепловых потерь и тока дуги вдоль реза имеют характерный максимум в зависимости усредненной плотности тока дуги вдоль реза, приходящийся на 1-2 секции. Тогда, как известно [3], зона шунтирования начинается с некоторого сечения начального участка, где возможно возникновение пробоя между дугой и поверхностью полости реза, и простирается в переходном участке до основного участка течения или участка развитого турбулентного течения. Отметим, что при прямой полярности зона шунтирования должна располагаться несколько выше по потоку, чем в случае обратной полярности подключения плазмотрона, так как условия пробоя, когда дуга является для него катодом а следовательно, источником электронов, будут более благоприятны и поэтому требуются меньшие пробивные напряжения.

Таким образом, течение газа в области полости реза рекомендуется разбивать на четыре зоны. Первая зона включает часть начального участка струи от среза сопла до поверхности разрезаемого металла. В этой зоне начинается размывание струи и образование конусообразного турбулентного слоя. Во второй зоне, простирающейся от поверхности разрезаемого металла до сечения, проходящего через конец начального участка, пространственная стабильность дуги нарушается и развивается пробой между столбом дуги и поверхностью полости реза. Этот процесс определяет положение начала зоны шунтирования. Отметим, что с верхней кромки реза развивается второй пограничный слой по поверхности вдоль потока плазмы. Этот слой в конце начального участка смыкается, что определяет сечение начала третьей зоны - зоны перемежаемости, которая простирается до четвертой зоны - зоны развитого турбулентного течения. Из приведенных рисунков распределения тепловых потерь и тока дуги вдоль реза можно определить, что зона шунтирования простирается на 4-8 см.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что с целью увеличения прорезающей способности плазмотрона должна быть снижена степень турбулентности потока на его начальном участке путем улучшения аэродинамического качества плазмотрона, а в полостиреза необходимо перераспределить и выровнять тепловые потоки вдоль полости реза.

## Л и т е р а т у р а

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. -М: Наука, 1969. -824 с.
2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. -М: Наука, 1969. -742 с.
3. Жуков М.Ф., Коротеев А.С., Урюков Б.А. Прикладная динамика термической плазмы. - Новосибирск: Наука, 1975. -298 с.