

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ И ПОВЕРХНОСТЬЮ РЕЗА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛИСТА

<sup>1</sup>Веремейчик А.И., д.т.н. <sup>1</sup>Сазонов М.И., к.т.н. <sup>1</sup>Хвисевич В.М., Ph.D <sup>2</sup>Цыганов Д.Л.

<sup>1</sup>УО «Брестский государственный технический университет», Брест

<sup>2</sup>Instituto de Plasmas de Fusao Nuclear, Instituto Superior Tecnico, Lisboa (Portugal)

### Введение

Плазменная резка широко применяется в различных областях производства, что обусловлено возможностью ее использования для резки с высокой производительностью и точностью как специальных сталей, так и цветных металлов [1]. В настоящее время накоплен определенный опыт ее практического применения [1]. Вместе с тем в существующей литературе ограничены работы по изучению физических и тепловых процессов, происходящих при резке металлов, т.к. при резке плазменной дугой возникает три источника тепла: подвижное пятно дуги, столб дуги и струя плазмы. Каждый из них вносит свою долю тепла по всей высоте реза. Для изучения процесса резки металлов и особенно теплообмена между плазменной дугой и поверхностью реза предлагается секционированная модель реза.

### Методика исследований и основные результаты

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 полущели, моделирующей рез в листовом металле (рисунок 1).

Для проведения эксперимента использовался плазмотрон со сменными соплами с внутренним диаметром 3,5; 4,0; 5,0 мм. Расход воздуха через плазмотрон изменялся в пределах 1,0 – 4,0 г/с. Воздух подавался в дуговую камеру с закруткой с целью стабилизации дуги в дуговой камере на оси плазмотрона. Эксперименты проводились при прямой и обратной полярности подключения плазмотрона к источнику электропитания, когда внутренний электрод плазмотрона служил катодом или анодом.

В качестве модели полости реза использовался набор из охлаждаемых водой медных секций. Каждая секция диаметром 100 мм и толщиной 9,5 мм имела щель от центра секции по радиусу, причем ширина щели была выбрана равной 8 мм, характерной при резке металлов большой толщины. Секции при помощи 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 плазмотроном так, что образующая сопла плазмотрона проецировалась на оси полуокружности щели и секции.

Для изучения распределения тока дуги вдоль реза была применена электрическая схема измерений, приведенная на рисунке 1. Каждая секция модели электрически соединялась с положительным или отрицательным полюсом источника электропитания через амперметр типа Ц – 4311 класса точности 0,5. Для исследования распределения и тепловых потоков вдоль полости реза каждая секция модели отдельно охлаждалась водой. Индивидуальный подвод воды к секциям модели позволил провести измерение тепловых потерь от плазменной дуги в секции. 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.

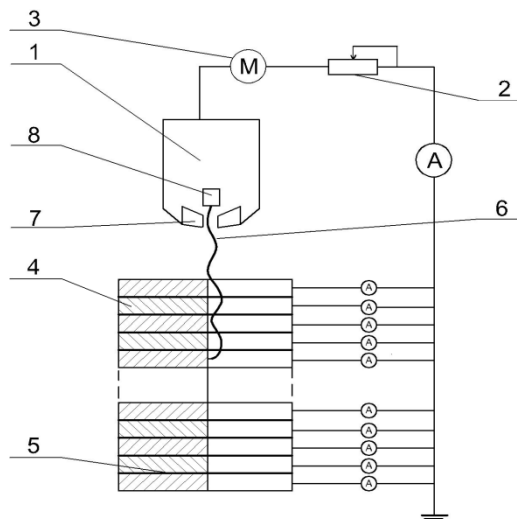


Рисунок 1 - Схема электропитания плазмотрона и системы измерений  
 1 – плазмотрон; 2 – балластное сопротивление; 3 – источник электропитания постоянного тока;  
 4 – секция модели полости реза; 5- изолятор; 6 – электрическая дуга, 7-сопло; 8- электрод

Следует отметить, что предложенная модель полости реза в некоторой степени отличается от реального реза в листовом металле, производимого при помощи плазмотрона. 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, установление 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 приблизительно 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 прорезающей способности плазменной дуги.

На рисунке 2 приведено типичное распределение тепловых потерь, приходящих на единицу длины вдоль оси модели полости реза при расходе воздуха  $G = 2,5$  г/с, токе дуги  $I = 140$  А, диаметре сопла  $d_c = 4$  мм и расстоянии от среза сопла до модели  $l = 12$  мм. На рисунке координаты секции отнесены к их среднему сечению. Как видно из рисунка, максимальный тепловой поток приходится на первые две секции, далее вниз по потоку он экспоненциально уменьшается.

Установлено, что изменение расхода в пределах 1,0-3,0 г/с рабочего газа через плазмотрон позволяет незначительно перераспределить характер теплообмена плазменной дугой и металлом полости реза.

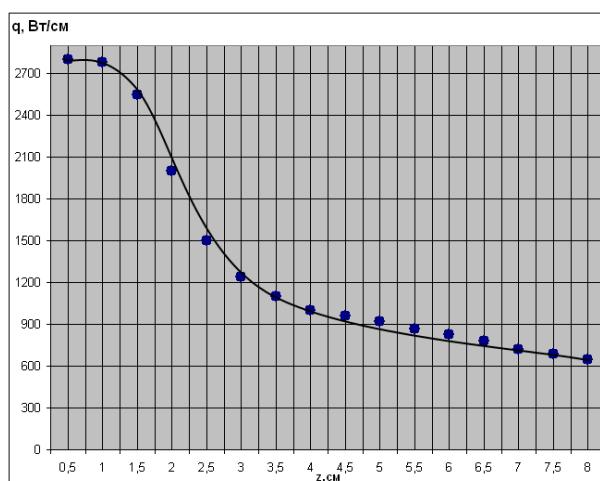


Рисунок 2 – Типичное распределение тепловых потерь вдоль рез при расходе воздуха  $G = 2,5$  г/с,  $I = 140$  А,  $d_c = 4$  мм,  $l = 12$  мм

Установлено также, что увеличение тока дуги от 60 до 160 А и ее мощности приводит к увеличению в 2 раза тепловых потоков в стенку реза и соответственно прорезающей способности плазмотрона.

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

Для изучения поведения дуги при прямой 1 и обратной 2 полярностях в полости реза были проведены измерения распределения тока дуги вдоль реза. На рисунке 3 приведены типичные усредненные на единицу длины токи в сечении в зависимости от расстояния вдоль полости реза при токе дуги 90 А, диаметре сопла 5 мм, расстоянии плазмотрона от металла 12 мм и расходе воздуха 2,0 г/с. Из полученных результатов следует, что распределение тока дуги вдоль реза существенно зависит от полярности подключения дуги.

Из сравнения зависимостей 1 и 2 можно сделать вывод, что при малых толщинах разрезаемого листа металла для увеличения скорости резки следует применять прямую полярность подключения плазмотрона, а при резке металла большей толщины – обратную полярность.

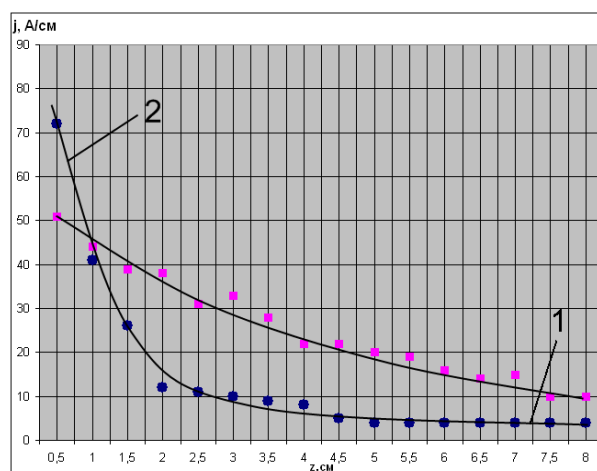


Рисунок 3 - Распределение усредненной плотности тока дуги вдоль реза при прямой 1 и обратной 2 полярностях  $G = 2,0$  г/с,  $d_c = 4$  мм,  $l = 12$  мм,  $I = 90$  А

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 [2]. В области потенциального начального участка протяженностью 7–9 калибров скорость течения и температура газа приблизительно постоянна. За пределами потенциального ядра формируется турбулентный пограничный слой. Распределение скорости и температуры газа в основном участке исследованы достаточно подробно и могут быть рассчитаны с удовлетворительной точностью по методике [2,3].

При резке металлов, когда электрический столб дуги горит на оси плазменной струи и дуга замыкается на металл в результате процесса шунтирования, течение газа в промежутке между плазмотроном и поверхностью металла и в полости реза определяется рядом сложных явлений. Прежде всего 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 [4,5]. 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 [5,6].

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 полость реза. Это положение основывается на результатах проведения исследований, которые показывают, что полученные распределения тепловых потерь и тока дуги вдоль реза имеют характерный максимум в зависимости усредненной плотности тока дуги вдоль реза, приходящейся на 1–2 секции. Тогда, как известно [4,7], 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 располагается несколько выше по потоку, чем в случае обратной полярности подключения плазмотрона, так как условия пробоя когда дуга является для него катодом, а следовательно, источником электродов, будут более благоприятны и поэтому требуются меньшие пробивные напряжения.

Таким образом, течение газов 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 4-й зоны – зоны развитого турбулентного течения. Из приведенных рисунков распределение тепловых потерь и тока дуги вдоль реза можно определить, что зона шунтирования простирается на 4–8 см.

## Заклучение

С целью изучения особенностей теплообмена дуги с поверхностью полости реза разработана и создана плазменная установка, которая позволяет смоделировать технологический процесс разделительной резки металлов. По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы: для увеличения прорезающей способности плазматрона обратной полярности должна быть снижена степень турбулентности потока на его начальном участке путем улучшения аэродинамического качества плазматрона: в полости реза необходимо перераспределить тепловые потоки вдоль полости реза путем организации дополнительного распределенного по резу вдува воздуха с малым расходом.

На основе измерений тепловых потоков и плотности тока в зависимости от расстояния от верхней кромки реза при малых толщинах разрезаемого листа металла для увеличения скорости резки рекомендуется применять прямую полярность подключения плазматрона, а при резке материалов большей толщины для повышения качества реза – обратную полярность.

## РЕЗЮМЕ

Для изучения процесса резки металлов предложена секционированная модель реза и проведены исследования формирования плазменной дуги и распределения плотности тока и тепловых потоков вдоль полости реза при прямой и обратной полярностях подключения плазматрона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ширшов, И.Г., Котиков, В.Н. Плазменная резка // М.: Машиностроение, 1987, 162с.
2. Абрамович, Г.Н. Прикладная газовая динамика // Г.Н. Абрамович. – М: Наука, 1969. – 824 с.
3. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя // Г. Шлихтинг. – М: Наука, 1969. – 742 с.
4. Жуков, М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы // М.Ф. Жуков, А.С. Кортаев, В.А. Урюков. Акад. наук СССР, Ин-т теплофизики Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.
5. Zhukov, M.F., Zasyrkin, I.M., Mishne, I.I., Sazonov, M.I Voltage gradient of an electric arc in fully developed turbulent flow of air // Phenomena in Ionized Gases: the 13-th Int. conf., Berlin Leipzig, Sept. 12-17, 1977. Pt.2. - P.539-540
6. Жуков, М.Ф., Засыркин, И.М., Мишне, И.И., Сазонов, М.И. Напряженность электрического поля дуги в развитом турбулентном потоке воздуха // Журнал прикладной механики и технической физики. 1979. №6. - С.1
7. Жуков М.Ф., Засыркин И.М., Мишне И.И., Сазонов М.И. Теплообмен в выходном электроде плазматрона с межэлектродной вставкой // Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. Серия технических наук. - 1979. - N 8, вып.2. - С.61

## SUMMARY

*In this article model the sectionalized model of cutting is proposed for study of process cutting metals. To studied the formation of the plasma arc, the current density distribution and heat flux along the cavity of cutting for direct and reverse polarity connection of plasmotron.*

**E-mail:** [vai\\_mrtm@tut.by](mailto:vai_mrtm@tut.by)  
[vmhvisevitch@bstu.by](mailto:vmhvisevitch@bstu.by)  
[tdl-tdl@rambler.ru](mailto:tdl-tdl@rambler.ru)

Поступила в редакцию 03.11.2014