

аналитически полученных выражениях с достаточной для подобного класса задач (максимальная ошибка составляет 15 % при точечном и 6 % – при линейном контакте) описывается экспонентой, аргумент которой прямо пропорционален радиусу тела качения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Reynolds, O.** On rolling friction / O. Reynolds // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. – 1875. – Vol. 166. – P. 155–174.

2 **Tabor, D.** The mechanism of rolling friction: the elastic range / D. Tabor // *Proceeding of the Royal Society of London. Ser. A*. – 1955. – Vol. 229, № 1177. – P. 198–220.

3 **Джонсон, К.** Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.

4 **Бондаренко, Л. Н.** Экспериментально-аналитическая оценка коэффициента гистерезисных потерь при качении колеса по рельсу / Л. Н. Бондаренко, В. В. Колбун, А. С. Овчинников // *Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки: междунар. сб. научн. тр.* – Гомель: БелГУТ, 2013. – Вып. 7. – С. 17–20.

5 **Справочник по кранам:** В 2 т. Т. 2 / М. П. Александров [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1988. – 559 с.

6 **Подвижной состав и тяга поездов** / А. П. Третьяков [и др.]. – М.: Транспорт, 1979. – 368 с.

7 **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.

L. N. BONDARENKO, V. V. KOLBUN, A. S. OVCHINNIKOV

DETERMINATION OF THE HYSTERESIS LOSSES COEFFICIENT FOR THE WHEEL ROLLING ON RAIL

The analysis of the hysteresis losses effect on the wheels - rail rolling resistance is performed. There were obtained the dependences of the rolling friction coefficient on the wheel radius for the cases of the initial point and linear contact.

Получено 27.01.2014

ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 8. Гомель, 2014

УДК 536.2

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М. И. САЗОНОВ, В. М. ХВИСЕВИЧ
Брестский государственный технический университет

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ДУГИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛОСТИ ПЛАЗМЕННОГО РЕЗА

С целью изучения особенностей теплообмена дуги с поверхностью полости реза разработана и создана плазменная установка, которая позволяет смоделировать тех-

нологический процесс разделительной резки металлов. Проведены исследования формирования плазменной дуги и распределения усредненной плотности тока и тепловых потоков в полости реза при различных полярностях подключения плазмотрона.

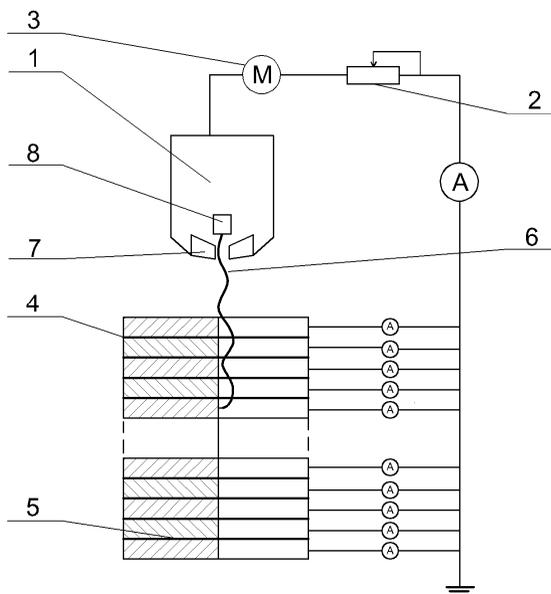
Введение. Плазменная резка широко применяется в различных областях производства, что обусловлено возможностью ее использования для резки с высокой производительностью и точностью как специальных сталей, так и цветных металлов. В настоящее время накоплен определенный опыт применения рассматриваемого процесса. Вместе с тем в известных литературных источниках практически отсутствует информация об особенностях физических и тепловых процессов, происходящих при плазменной резке.

При резке плазменной дугой возникает три источника тепловой энергии: подвижное пятно дуги, столб дуги и струя плазмы. Каждый из них вносит свою долю тепла по всей высоте реза. В данной статье для изучения процесса резки металлов предложена секционированная модель реза и проведены исследования формирования плазменной дуги и распределения ее усредненной плотности тока, а также выполнен анализ распределения усредненной плотности тока и тепловых потоков вдоль полости реза при прямой и обратной полярностях подключения плазмотрона.

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 полустели, 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, чтобы стабилизировать дугу 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 для резки 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.



1 – плазмотрон; 2 – балластное сопротивление; 3 – источник электропитания постоянного тока; 4 – секция модели полости реза; 5 – изолятор; 6 – электрическая дуга; 7 – сопло; 8 – электрод

Рисунок 1 – Схема электропитания плазмотрона и системы измерений

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 тепловых потоков вдоль полости реза каждая секция модели отдельно охлаждадалась 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 специальное 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 плазмотрона. Отличие заключается в том, что при резке в об-

ласти 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 сравнивались с параметрами, измеренными непосредственно при резке металла. Сравнение вольт-амперных характеристик для исследованных диапазонов тока дуги и расходов 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, приходящихся 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. Как видно из рисунка, на котором координаты каждой секции отнесены к их среднему сечению, максимальный тепловой поток приходится на первые две секции, далее вниз по потоку он экспоненциально уменьшается.

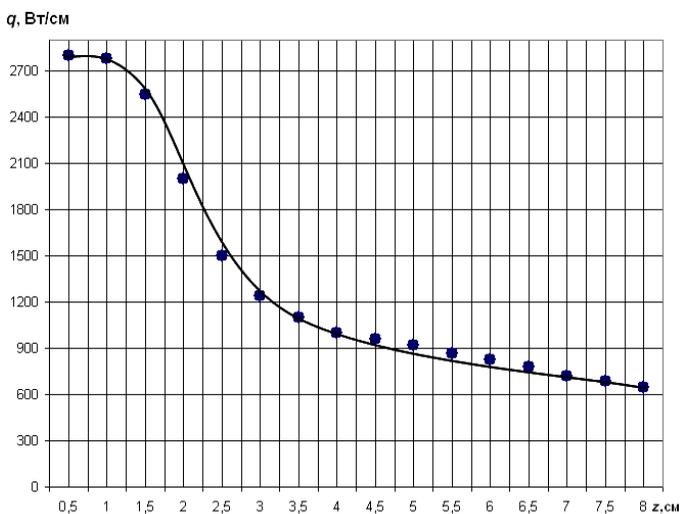


Рисунок 2 – Типичное распределение тепловых потерь вдоль реза при расходе воздуха $G = 2,5$ г/с, $I = 140$ А, $d_c = 4$ мм, $l = 12$ мм

Установлено, что изменение расхода рабочего газа через плазматрон в пределах 1,0–3,0 г/с ведет к незначительному перераспределению характера теплообмена между плазменной дугой и металлом полости реза. Определено 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 показало, что при увеличении диаметра сопла от 3,5 до 5 мм и расстояния l между плазмотроном и моделью от 12 до 20 мм тепловые потоки изменяются вдоль полости реза пренебрежимо мало. Однако следует отметить, что уменьшение диаметра сопла и расстояния l от плазмотрона до модели приводит к некоторому возрастанию тепловых потерь во всех сечениях реза и, следовательно, к улучшению прорезающей способности плазмотрона.

Для изучения поведения дуги при разных полярностях подключения плазмотрона были проведены измерения распределения тока дуги вдоль реза. На рисунке 3 приведены типичные усредненные на единицу длины токи в секции 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.

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

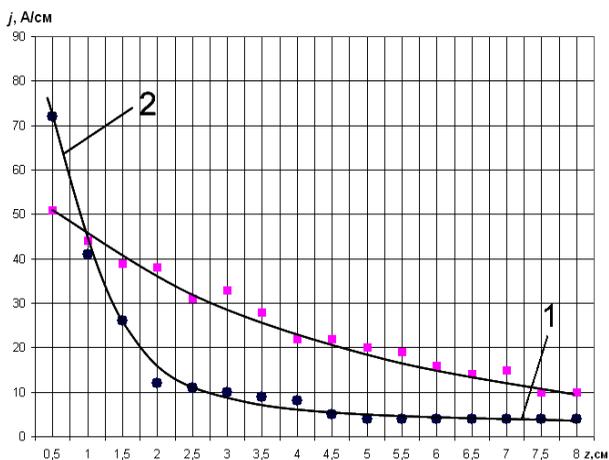


Рисунок 3 – Распределение усредненной плотности тока дуги вдоль реза при прямой 1 и обратной 2 полярностях подключения плазмотрона $G = 2,0$ г/с, $d_c = 4$ мм, $l = 12$ мм, $I = 0$ А

Результаты исследования распределения 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 плазматрона плазменную струю можно представить состоящей из трех участков: начального, переходного и основного [1]. 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 известной [1, 2] методике.

При резке металлов, когда электрический столб дуги горит на оси плазменной струи, а дуга замыкается на металл в результате процесса шунтирования, течение газа в промежутке между плазматроном и поверхностью металла и в полости реза определяется рядом сложных явлений. Прежде всего следует отметить, что на выходе сопла плазматрона 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 плазматрон. 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 плазматрона до поверхности разрезаемого металла, которое составляет 10–14 мм, начальный участок струи входит в полость реза. Этот вывод основывается на результатах проведения исследований, которые показывают, что полученные распределения тепловых потерь и тока дуги вдоль реза имеют характерный максимум. Он зависит от усредненной плотности тока дуги и приходится на первую и вторую 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 основной области течения или участка развитого турбулентного течения. Отметим, что при прямой полярности зона шунтирования располагается несколько выше по потоку, чем в случае обратной полярности подключения плазматрона, так как при использовании катода (источника электронов) в качестве дуги требуется меньшее пробивное напряжение.

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, которое проходит 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 графиков распределения тепловых потерь и тока дуги вдоль реза можно определить, что зона шунтирования простирается на 4–8 см.

Заключение. Для изучения особенностей теплообмена дуги с поверхностью полости реза создана плазменная установка, позволяющая моделировать технологический процесс разделительной резки металлов.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1 Для увеличения прорезающей способности плазматрона обратной полярности должна быть снижена степень турбулентности потока на его начальном участке путем улучшения аэродинамического качества плазматрона.

2 В полости реза необходимо перераспределить тепловые потоки вдоль самой полости путем организации дополнительного распределенного по резу вдува воздуха с малым расходом.

3 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 **Абрамович, Г. Н.** Прикладная газовая динамика / Г. Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.

2 **Шлихтинг, Г.** Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. – 742 с.

3 **Жуков, М. Ф.** Прикладная динамика термической плазмы / М. Ф. Жуков, А. С. Коротяев, В. А. Урюков. – Новосибирск: Наука, 1975. – 298 с.

A. I. VERAMEJCHIK, M. I. SAZONOV, V. M. KHVISEVICH

HEAT EXCHANGE BETWEEN THE ARC AND PLASMA CUT CAVITY SURFACE

In order to study the features of the heat exchange between the arc and plasma cut cavity surface the plasma stand was worked out and created. It allows to simulate the technological process of the separating metal cutting. There were performed investigations for the plasma arc formation and distribution of the current average density and heat flows in a cut cavity at different polarities of the plasmatron connection.

Получено 14.10.2014