

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

Сумец А. В.

Проведен анализ основных направлений и методов повышения эффективности плазменной резки. Изучен ряд проблем, обуславливающих ограничения процесса плазменно-дуговой резки, связанных со сложностью и материалоемкостью плазморезательной техники и снижающие эффективность процесса резки. Рассмотрены металлургические процессы, протекающие в металле, прилегающем к поверхности реза. Изучены преимущества плазмотронов с полыми «холодными» и «горячими» катодами.

Проведено аналіз основних напрямків та методів підвищення ефективності плазмового різання. Вивчено ряд проблем, що зумовлюють обмеження процесу плазмово-дугового різання, які пов'язані зі складністю та матеріалоемністю плазморізальної техніки та знижують ефективність процесу різання. Розглянуто металургійні процеси, що протікають в металі, який примикає до поверхні різку. Вивчено переваги плазмотронів з порожнистими «холодними» та «гарячими» катодами.

The analysis of the main trends and methods to increase the efficiency of plasma cutting is conducted. A number of problems that lead to limitation of plasma-arc cutting process associated with the complexity and materials consumption of plasma cutting equipment and reduce the efficiency of the cutting process is studied. Metallurgical processes taking place in the metal adjacent the cutting surface are considered. The benefits of plasma torches with hollow "cold" and "hot" cathodes are studied.

Сумец А. В.

аспирант ДГМА
ptm@dgma.donetsk.ua

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 621.791.75.042

Сумец А. В.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКИ

Плазменная резка является относительно новой технологией и имеет определенные преимущества перед традиционными методами газопламенной и кислородной резкой. Перспективность этой технологии обусловлена высокими энергетическими параметрами плазменной режущей дуги: объемная концентрация мощности достигает $100\text{--}150\text{ кВт/см}^2$, температура $(5\text{--}16)\cdot 10^3\text{ К}$, скорость истечения потока плазмы до 5000 м/с , удельная плотность тепловой мощности $(10\text{--}20)\text{ кВт/мм}^2$ [1, 2]. Высокая концентрация мощности, возможность управления процессом за счет изменения величины рабочего тока или расхода плазмообразующего газа и, наконец, возможность резки практически любых металлов придают этому способу универсальные технологические возможности. Однако наряду с отмеченными преимуществами современный процесс плазменно-дуговой резки металлов имеет и существенные ограничения, обусловленные излишней сложностью и материалоемкостью плазморезательной техники, нередко связанной с неоправданной её универсализацией по способам (ручной, машинной), диапазонам разрезаемых толщин, энергетическим параметрам и т.д. [1–3].

Цель работы – анализ основных направлений и методов повышения эффективности плазменной резки.

Процессы термической резки сопровождаются выплавлением металла из полости реза. В связи с быстрым перемещением точечного источника нагрева относительно поверхности разрезаемого металла наблюдается большой перепад температур (от температуры плавления до исходной) на сравнительно узком участке, прилегающем к поверхности реза. В результате в кромках металла происходят металлургические процессы, сопровождающиеся изменениями химического состава структурных составляющих и механических свойств металла. Скорость нагрева и охлаждения металла на глубине до $0,1\text{ мм}$ от кромки реза могут достигать весьма высоких значений. Наряду с качественным характером изменений металла в зоне термического влияния (ЗТВ) имеют существенное значение общая протяженность ЗТВ, глубина отдельных переходных зон: литого участка, укрупненного зерна, полной и неполной перекристаллизации. Характер и размеры ЗТВ зависят от состава и толщины разрезаемого металла, рабочего тока и скорости резки. Перекристаллизация в кромках металла с изменением фазового состава структуры вызывает напряжения, которые могут в отдельных случаях привести к образованию трещин в поверхностных слоях ЗТВ. На изменение химического состава металла существенное влияние оказывает плазмообразующая среда. Процентное соотношение элементов, входящих в состав того или иного металла, может изменяться, т.е. увеличиваться или уменьшаться. Кроме того, поверхностный слой подвержен насыщению газами, изменяет свои свойства, оказывает отрицательное влияние на свариваемость металла. Наибольшие изменения такого характера имеют место в литом слое. При взаимодействии высокоскоростного газового потока с кромками реза происходит перемещение металла литого слоя на поверхности кромки. В результате этого глубина его по толщине листа становится неравномерной. Кроме того, на поверхности реза образуется своеобразный макрорельеф в виде вертикальных или наклонных к поверхности листа бороздок (рисок). Следовательно, общим для плазменной резки металлов является образование у кромки реза ЗТВ с участками оплавления и структурных изменений в твердом металле. В ЗТВ происходит изменение фазового состава, что приводит к повышению твердости и увеличению напряжений второго рода. Кроме рассматриваемых структурных изменений и твердости в литом участке ЗТВ происходит также изменение химического состава металла. Литой участок влияет на шероховатость поверхности реза. Чем меньше глубина литого участка ЗТВ, тем меньше шероховатость поверхности резов, так как на возникновение шероховатости (бороздок) и на её ве-

личину оказывают влияние скорость резки, толщина металла, размер канала сопла [4]. Из всех принимаемых во внимание факторов наиболее сильное влияние на образование бороздок оказывает неравномерная скорость резки. Взаимодействие газовой составляющей дуги с расплавленным металлом приводит к интенсивному его окислению. При этом в зависимости от состава плазмообразующей среды и марки разрезаемого металла степень изменения химического состава кромки реза будет различной. Так при резке высокоуглеродистых сталей происходит науглероживание кромки реза. Процесс проходит вследствие избирательного окисления железа. Одновременно наблюдается выгорание на кромках реза кремния, марганца и хрома. Это связано с большим, чем у железа, сродством этих элементов к кислороду. Кроме того, отмечено обогащение кромок плазменного реза при кислородосодержащей плазме никелем и медью, что объясняется меньшим сродством этих элементов к кислороду, чем железа, при данных условиях резки.

Резка нержавеющей стали также сопровождается процессом испарения и реакциями окисления металла и вызывает его химическую неоднородность на поверхности реза. Изменение на поверхности реза содержания марганца, титана и хрома по сравнению с содержанием этих элементов в основном металле можно объяснить окислением. Увеличение содержания в прилегающей к резу зоне никеля, являющегося слабо окисляемым элементом, происходит вследствие выгорания других компонентов стали. Наибольшее обеднение химического состава стали происходит в зоне нагревания плазменной дуги. Кроме того, выпускаемое серийное оборудование для воздушно-плазменной резки (ВПр) металлов плазмотронами с циркониевыми и гафниевыми катодными вставками, разработанными фирмами Украины, Германии, Италии и других стран имеет ряд серьезных недостатков. К ним относятся: ограниченное число включений, низкие рабочие диапазоны тока и напряжения. Это приводит к снижению толщины разрезаемого металла, скорости резки и производительности.

Обзор теоретических и экспериментальных исследований по состоянию и перспективам развития плазменной резки показывает, что успешное её внедрение в производство, в значительной мере, зависит от эффективности процесса нагрева вещества за счет энергии, выделяющейся в разрядном канале плазмотрона, т.е. от эффективного КПД нагрева. Однако при оценке процесса резки необходимо учитывать и другие показатели, влияющие на эффективность. Такие как ресурс работы и мощность плазмотрона, температура и массовый расход нагреваемого газа, характер распределения теплового потока по пятну нагрева и др. Кроме того, эффективный КПД плазменной дуги в среднем на 10–30 % больше КПД плазменной струи [1], а тепловая мощность плазмотрона повышается при использовании высокоэнтальпийных молекулярных газов и их смесей (водорода, аммиака, азота). Еще большие мощности реализуются при применении химически активных плазмообразующих газов (воздух, кислород), способных вступать в экзотермические реакции с обрабатываемым изделием.

Отечественной промышленностью выпускается целый ряд технологических плазмотронов для резки, отличающиеся геометрией разрядного канала, параметрами нагреваемого газа, его подачей и стабилизацией, конструкцией и материалом электродов, схемой и источниками электропитания. Наряду с достоинствами серийные плазмотроны для резки обладают и недостатками, что снижает эффективность плазменной резки. Так, например, возможности реза плазмотронов для ВПр в основном ограничены толщиной металла до 70 мм [5]. Производство требует создания комплекса оборудования, обеспечивающего резку черных и цветных металлов толщиной 100–300 мм [5, 6]. Кроме того, все серийные плазмотроны для резки имеют один общий недостаток – это низкий ресурс работы электрода (катода) и сопла [1, 5, 6]. Применение термокатодов с защитой их инертным газом позволяет при токах 500–1000 А достичь ресурса 100 ч и более, однако все это требует дополнительных затрат при создании, изготовлении и эксплуатации плазмотронов, что не всегда экономически оправдано. Проведенный обзор исследований [7–9] показал, что с точки зрения указанных проблем наиболее перспективными являются плазмотроны с полыми цилиндрическими «холодными» и «горячими» катодами.

Эрозия материала электродов происходит вследствие сложных тепловых, механических и химических процессов в приэлектродных областях, а также джоулевого выделения теплоты в металле. Все эти процессы в определенных условиях могут оказывать решающее влияние на тепловое состояние электродов, но качественная оценка доли вклада каждого процесса не всегда возможна. Имеющиеся экспериментальные данные разных авторов отличаются друг от друга по величине иногда на несколько порядков. Для «холодных» катодов до сих пор нет единой точки зрения на то, что является определяющим в переносе заряда в прикатодной области; еще больше противоречий по величине плотности тока на катоде [7–9]. В силу сказанного, исходным материалом для определения важнейших характеристик – удельного теплового потока в зоне контакта дуги с поверхностью, служат экспериментальные данные о тепловых потоках и размерах эрозионной поверхности. На величину теплового потока в выбранной рабочей среде (азот, воздух) оказывает влияние материал катода и давление газа.

Так как эрозия катода в значительной степени зависит от его теплового состояния, то было установлено, что как перегрев, так и переохлаждение катода приводят к росту эрозии. Это обусловлено повышением скорости испарения материала или даже капельного уноса. На рис. 1 приведена зависимость удельной эрозии интенсивно охлаждаемого водой трубчатого электрода от силы тока [10].

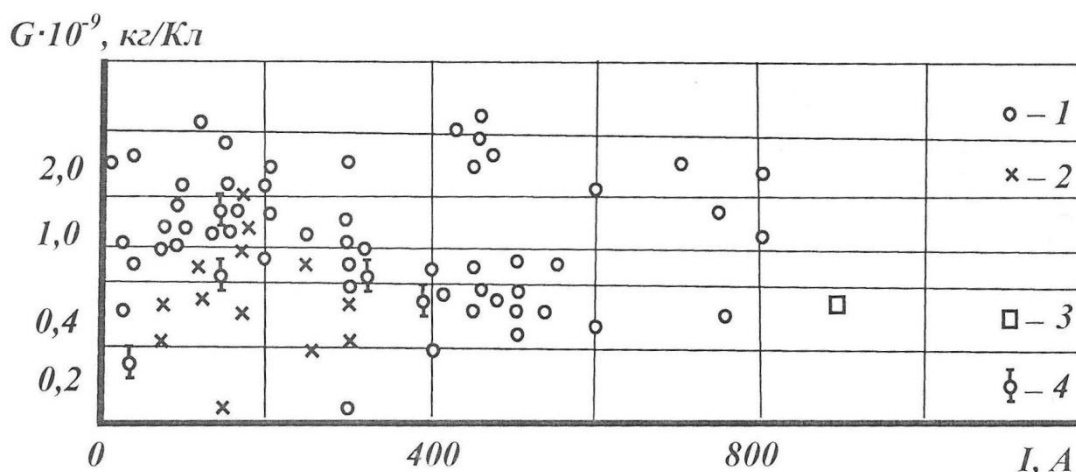


Рис. 1. Зависимость удельной эрозии выходного трубчатого электрода двухкамерного плазматрона от тока: 1 – воздух, медь, постоянный ток; 2 – воздух, медь, переменный ток; 3 – водород, медь, постоянный ток; 4 – воздух, титан, постоянный ток

Опорное пятно дуги с достаточно большой скоростью перемещается по внутренней поверхности электрода, что приводит к снижению «эффективного» удельного теплового потока в тело электрода и уменьшению тем самым эрозии. Такой режим осуществляется во многих схемах плазматронов. В диапазоне токов 100–1000 А, независимо от рода тока и газа, удельная эрозия «холодного» электрода достаточно большая, что, по-видимому, связано со скачкообразным перемещением пятна дуги вдоль поверхности электрода [10, 11].

Пятно дуги на поверхности электрода остается неподвижным в течение времени $t = 10^{-5} - 10^{-4}$ с. За столь малое время в локальной зоне прогревается до температуры плавления только тонкий поверхностный слой.

Для меди и железа толщина поверхностного слоя равна при $t = 10^{-4}$ с соответственно 0,3 и 0,1 мм, что на два порядка меньше возможной толщины электрода. Отсюда следует, что эрозионные процессы на «холодных» электродах протекают в тонком слое. Следовательно, одно из возможных решений снижения эрозии лежит на пути повышения температуры электрода, и тем самым уменьшения времени t . Применение в качестве плазмообразующего газа смесей воздуха с углеродосодержащими газами приводит к резкому снижению эрозии мед-

ных электродов. Причем в первые 15–20 ч эрозия отсутствует полностью (ток дуги 300 А). В диапазоне токов от 200 до 800 А эрозия сопла-анода плазмотрона составляет 10^{-10} – 10^{-9} кг/Кл [12]. Анализ многочисленных исследований в этом направлении говорит о том, что имеется целый ряд других факторов, влияющих на ресурс, КПД плазмотрона и эффективного КПД нагрева вещества, учет которых позволяет улучшить энергетические характеристики и повысить эффективность плазменных технологий в процессах резки, напыления и нагрева газа [4, 7–9, 13–16]. Таким образом, с целью повышения эффективности плазменной резки необходимо разработать высокоресурсные и высокоэффективные плазмотроны, работающие на агрессивных газах с полыми «холодными» и «горячими» катодами.

ВЫВОДЫ

Повышение эффективности плазменной резки зависит от энергетических характеристик плазмотрона: мощности, температуры плазменной струи или дуги, теплового КПД, эффективного КПД нагрева вещества и ресурса работы. Выпускаемые промышленностью серийные технологические плазмотроны для резки имеют низкие ресурс работы электродов (не более 50 ч), тепловой КПД (не более 0,5–0,7), эффективный КПД нагрева вещества (30–40 %) и мощность. Наиболее перспективными плазмотронами, решающими проблему эффективности плазменных технологий являются плазмотроны с полыми цилиндрическими «холодными» и «горячими» катодами, однако и они требуют улучшения их энергетических характеристик. При разработке плазмотронов с полыми цилиндрическими катодами следует учитывать опыт зарубежных фирм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка - перспективный метод термической резки // Сварочное производство. – 2002. – №4. – С. 28–32.
2. Дзюба В.Л. Физика, техника и применение низкотемпературной плазмы / В.Л. Дзюба, К.А. Корсунов // Луганск: Издавництво СНУ ім. В. Даля. – 2007. – 448 с.
3. Пузряков А.Ф. Новые разработки и перспективы использования плазменных технологий / А.Ф. Пузряков // Сварочное производство. – 1997. – №2. – С. 21–25.
4. Жуков М.Ф. Исследование и разработка электродуговых плазмотронов линейной схемы / М.Ф. Жуков, В.П. Лукашов // Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова. – 1988. – С. 3–8.
5. Эсибян Э.М. Воздушно-плазменная резка: состояние и перспективы / Э. М. Эсибян // Автоматическая сварка. – 2000. – №12. – С. 6–20.
6. Васильев К.В. Особенности плазменно-дуговой резки в азотно-кислородных смесях / К. В. Васильев // Автоматическая сварка. – 2000. – № 12. – С. 21–25.
7. Даутов Г.Ю. Плазмотроны со стабилизированными электрическими дугами / Г.Ю. Даутов, В.Л. Дзюба, И.Н. Карп. – К.: Наукова думка. – 1987. – 168 с.
8. Костин Н.А. Вихревые электродуговые плазмотроны с «холодными» электродами / Н.А. Костин, В.Н. Станкевич // Физика низкотемпературной плазмы. – Минск. – 1991. – Т.3. – С. 192–193.
9. Балановский А.Е. Развитие плазменных технологий: сварка, наплавка, упрочнение, резка / А.Е. Балановский // Сварка в Сибири. – 2000. – №2. – С. 8–19.
10. Жуков М.Ф. Прикладная динамика термической плазмы / М.Ф. Жуков, А.С. Коротеев, Б.А. Урюков // Новосибирск: Наука. – 1975. – 300 с.
11. Дзюба В.Л. Лазерные и электронные пучки в материале обработки / В.Л. Дзюба, И.А. Волков // Луганск: Ноулдждж. – 2010. – 322 с.
12. Петров С.В. Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности / С.В. Петров, А.Г. Сааков. – К.: Топас, 2000. – 220 с.
13. Щицын Ю. Д. Плазменные технологии в сварочном производстве / Ю.Д. Щицын // Перм. гос. техн. ун-т. Пермь. – Ч. 1. – 2004. – 73 с.
14. Дзюба В.Л. Электродуговые и высокочастотные плазмотроны в химико-металлургических процессах / В.Л. Дзюба, Г.Ю. Даутов, И.Ш. Абдуллин // К.: Вища школа. – 1991. – 170 с.
15. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники / А.П. Достанко, С.П. Кундас, С.В. Бордусов и др. // Минск: ФУ Аинформ. – 2001. – Т.3. – 392 с.
16. Чередниченко В.С. Плазменные электротехнические установки / В.С. Чередниченко, А.С. Аньшаков // Новосибирск: НГТУ. – 2011. – 602 с.