

ФОКУСИРУЮЩИЕ ЛИНЗЫ АППАРАТОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

В.В. Евстигнеев, В.Т. Доронин (г. Барнаул, Россия)

Соединение деталей в единое изделие осуществляют способами сварки. Дуговая сварка требует присадочного материала, что приводит к деформации изделий и снижению эксплуатационных параметров изделий из-за неблагоприятных швов. Применяются внутренняя дуговая сварка при выполнении угловых швов, сварка прорезными швами и электронно-лучевая сварка. Соединение деталей осуществляется также высокотемпературной пайкой, которая нетехнологична из-за жестких размерных допусков на готовое изделие и из-за деформации изделия при пайке. Нетехнологична и вакуумная высокотемпературная пайка в печи. В последние годы используется электронно-лучевая сварка. Целью наших исследований являлось улучшение характеристик процесса электронно-лучевой сварки по сравнению с традиционными способами путём использования более совершенных сварочных устройств с электромагнитными, магнитными, электрическими и электростатическими фокусирующими линзами. Фокусировка заключается в сборе летящих электронов в тонкий луч, дающий точку на свариваемом изделии. Схема электростатической фокусирующей линзы дана на рисунке 1.

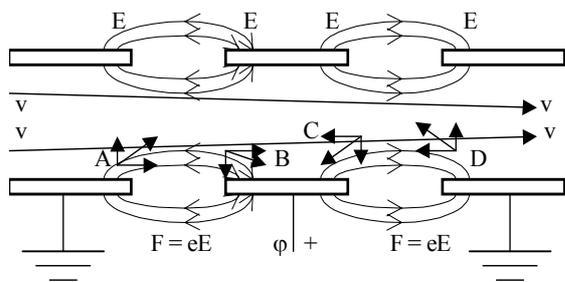


Рисунок 1 – Электростатическая фокусирующая линза для электронно-лучевой сварки и силовые линии электростатического поля в линзе

Действие электростатической линзы зависит от параметров электрического поля между двумя соседними электродами. Работу электростатической линзы можно понять, проследив за поведением проходящего через линзу параллельного пучка частиц. Попав в область «а», электроны испытывают действие силы с боковой компонентой силы, которая прижимает электроны к оси. В области «b» электроны, казалось бы, должны полу-

чить равный по величине, но противоположный по знаку импульс, однако это не так. К тому времени, когда они достигнут области «b», энергия их несколько увеличится, и поэтому на прохождение области «b» они затратят меньше времени. Силы здесь те же, время действия меньше, поэтому импульс будет меньше. Полный импульс силы при прохождении областей «а» и «b» направлен к оси фокусирующей линзы, в результате электроны стягиваются к одной общей траектории. Покидая область высокого напряжения, электроны получают добавочный толчок по направлению к оси фокусирующей линзы. В области «с» сила направлена от оси линзы, в области «d» сила направлена к оси линзы, но в области «d» частица остается дольше, поэтому полный импульс направлен также к оси линзы. Для небольших расстояний от оси линзы полный импульс силы на протяжении всей линзы пропорционален расстоянию от оси, и это является основным условием, необходимым для обеспечения фокусировки линз такого типа. С помощью этих рассуждений можно убедиться, что фокусировка будет достигнута во всех случаях, когда потенциал в середине электрода по отношению к двум другим либо положителен, либо отрицателен.

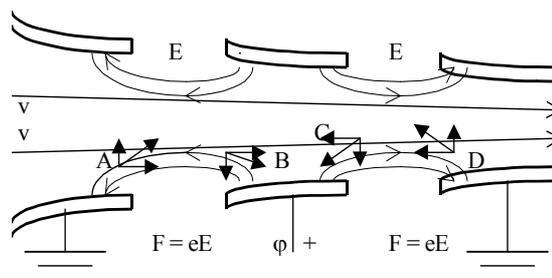


Рисунок 2 – Усовершенствованная электростатическая фокусирующая линза для электронов и силовые линии электростатического поля в линзе

На рисунке 2 представлена усовершенствованная электростатическая фокусирующая линза и силовые линии электростатического поля в линзе. Использование: сварка тугоплавких и жаропрочных материалов. Сущность изобретения: устройство для электронно-лучевой сварки, содержащее катод, сетку смещения потенциала, ускоряющий анод с отверстием, высоковольтный ис-

точник постоянного тока и фокусирующую линзу. Фокусирующая линза электростатическая, состоит из трёх электродов, изготовленных в виде раструбов, размещающихся широкой частью со стороны ускоряющего анода, и узкой частью размещающихся со стороны свариваемого изделия. Технический результат: увеличение фокусировки электронного луча, уменьшение энергопотребления, значительное уменьшение габаритов.

Применяется также электростатическая фокусировка с помощью ускоряющего электрического поля. В ускоряющем зазоре между электродами электрическое поле провисает внутрь зазора, к оси зазора. В первой части зазора электрическое поле прижимает частицу к продольной оси электродов и зазора. Во второй части зазора электрическое поле отклоняет заряженную частицу от оси. Поскольку заряженная частица, ускоряясь, пролетает вторую часть зазора между ускоряющими электродами быстрее, чем первую, то фокусирующее действие напряжённости электрического поля оказывается преобладающим. Электростатическая фокусировка заряженных частиц, основанная на изменении скорости, эффективна лишь при малых скоростях электронов, поэтому её применение ограничено. Фокусировке электронов препятствует взаимное отталкивание ускоряемых электронов, которое начинает сказываться при больших интенсивностях пучков.

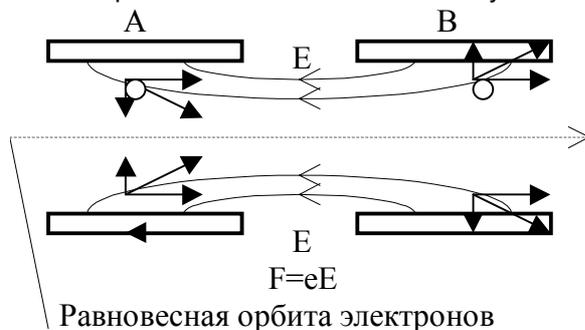


Рисунок 3 – Фокусировка электронов в ускоряющем зазоре.

В различных устройствах взаимодействие заряженных частиц сказывается по-разному, но обычно именно взаимодействие частиц определяет предельно достижимую интенсивность пучка электронов.

На рисунке 4 изображена схема усовершенствованной фокусировки электронов в ускоряющем зазоре между двумя электродами, изготовленными в виде раструбов. В

первой части зазора электрическое поле прижимает электрон к продольной оси электродов. Во второй части зазора электрическое поле отклоняет электрон от оси. Поскольку электрон, ускоряясь, пролетает вторую часть зазора между ускоряющими электродами быстрее, чем первую, то фокусирующее действие напряжённости электрического поля оказывается преобладающим.

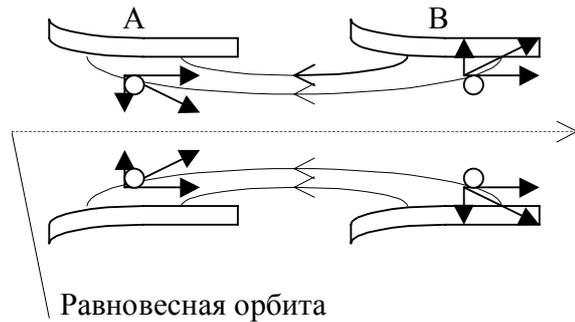


Рисунок 4 – Усовершенствованная фокусировка электронов в зазоре

Электростатическая фокусирующая линза выполнена в виде перекрещивающихся пар пластинчатых элементов 1, 2 и 3, 4, являющихся конденсаторами. Электрические поля пар 1, 2 и 3, 4 размещены в перекрещивающихся направлениях. Пластинчатые элементы 1, 2, 3, 4 изогнуты в поперечном сечении по окружным образующим концентрических полых цилиндров и изогнуты в продольном сечении по дугам продольных образующих изогнутых концентрических полых цилиндров. Обе пары пластинчатых элементов 1, 2 и 3, 4 оказываются изогнутыми в продольном сечении по дугам круговых орбит электронов. Пара 1, 2 и пара 3, 4 расположены в пересекающихся направлениях так, что электрические поля пар 1, 2 и 3, 4 пластинчатых элементов 1, 2, 3, 4 размещены в перекрещивающихся направлениях. Наложённые в пересекающихся направлениях электрические поля пар пластинчатых элементов образуют единое электрическое поле, представляющее для электронов электрический барьер.

Схема изготовления элементов 1, 2, 3, 4 дана на рисунке 5.

Схема взаимного размещения элементов 1, 2, 3, 4 дана на рисунке 6.

Ускоряющий электроны анод установлен около торцов пластинчатых элементов 1, 2, 3, 4 фокусирующей линзы вдоль щелевого промежутка между пластинчатыми элементами 1, 3.

ФОКУСИРУЮЩИЕ ЛИНЗЫ АППАРАТОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

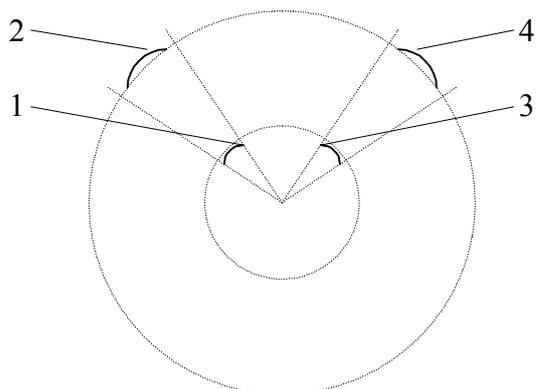


Рисунок 5 – Схема изготовления элементов 1, 2, 3, 4

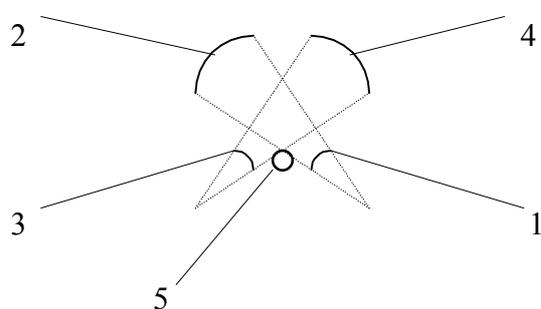


Рисунок 6 – Схема взаимного размещения элементов 1, 2, 3, 4

Пластинчатые элементы 1, 2, 3, 4 вырезаны из коаксиальных изогнутых в продольном сечении тонкостенных труб, внутренняя из которых в продольном сечении изогнута по дуге круговой орбиты электронов. Пластинчатые элементы 1, 3 изготовлены симметричными элементами путём вырезания из тонкостенной трубы, имеющей меньший диаметр. Пластинчатые элементы 2, 4 также изготовлены симметричными элементами путём вырезания из тонкостенной трубы, имеющей больший диаметр. В фокусирующей линзе на пути к свариваемому изделию пучок 5 электронов расположен между пластинчатыми элементами 1, 3. Электрическим барьером для электронов является электрическое поле в протяжённых областях пространства между пластинчатыми элементами 1, 2, 3, 4 со стороны щелевого промежутка между пластинчатыми элементами 1, 3. Последовательное в направлении увеличения радиуса изгиба пластинчатых элементов расположение щелевого промежутка между пластинчатыми элементами 1, 3, расположение электрического барьера, полученного наложением перекрещивающихся электрических полей, и

щелевого промежутка между пластинчатыми элементами 2, 4 обеспечивает фокусировку луча электронов. Свариваемое изделие размещено около дальних от ускоряющего анода торцов пластинчатых элементов 1, 2, 3, 4 фокусирующей линзы вдоль щелевого промежутка между пластинчатыми элементами 1, 3.

Для формирования электрического поля с электрическим барьером подают одинаковые электрические напряжения на каждый конденсатор фокусирующей линзы. Отрицательные, электрические потенциалы, от независимых друг от друга источников постоянного по направлению электрического напряжения, подаются на широкие пластинчатые элементы 3, 4 фокусирующей линзы. Одинаковые, положительные потенциалы подаются на узкие пластинчатые элементы 1, 3 фокусирующей линзы. Распределение напряжённости электрического поля в фокусирующей линзе 5 в зоне фокусировки электронов таково, что образуется поле между пластинчатыми элементами 1, 2 и 3, 4 с электрическим барьером для электронов.

Устройство для электронно-лучевой сварки работает следующим образом. Из катода через отверстие электрода смещения электроны вытягиваются электрическим полем между катодом и анодом и затем направляются к фокусирующей линзе. К пластинчатым элементам 1, 3 подведены положительные электрические потенциалы, а к пластинчатым элементам 2, 4 подведены отрицательные электрические потенциалы. Перекрещивающееся наложение электрических полей между пластинчатыми элементами 1, 2 и 3, 4, отрицательный потенциал на пластинчатых элементах 2, 4 и положительный потенциал на пластинчатых элементах 1, 3 сформировали между пластинчатыми элементами 1, 2, 3, 4 электрическое поле, являющееся электрическим барьером, предназначенным для фокусировки электронов. Для доступа к электрическому барьеру служит продольный щелевой промежуток между пластинчатыми элементами 1, 3. Повышенная результирующая напряжённость электрического поля между пластинчатыми элементами 1, 2, 3, 4, по сравнению с напряжённостью, необходимой для движения электронов по такой же траектории в непрерывном электрическом поле, создала физические условия, при которых электроны, не углубляясь в область сильного электрического поля, идут вдоль изогнутого электрического барьера. Эквипотенциальные поверхности электрического поля в локальной протяжённой области

электрического барьера имеют форму жёлоба, расположенного между пластинчатыми элементами 1 и 3. При наличии такого электрического барьера электроны, за счёт соответствующего размещения пластинчатых элементов 1, 2, 3, 4, направлены касательно к вогнутой стороне пластинчатых элементов 1, 3. При подходе к электрическому барьеру, образованному суперпозицией в пересекающихся направлениях электрического поля между пластинчатыми элементами 1, 2 и электрического поля между пластинчатыми элементами 3, 4, постепенно меняется направление движения электронов из-за увеличения напряжённости электрического поля, и в дальнейшем электроны летят по дуговой траектории вдоль вогнутой стороны электрического барьера. Вогнутая сторона электрического барьера расположена вдоль продольного щелевого промежутка между пластинчатыми элементами 1, 3. При напряжённости электрического поля, удовлетворяющей условию $E > mv/qR$, где R - радиус изгиба электрического барьера, электрон перемещается вдоль электрического барьера. Радиус орбиты всех фокусируемых электронов определяется не величиной напряжённости поперечного электрического поля на пути электронов, а положением электрического барьера в пространстве, при достаточной величине электрического барьера. Посредством размещённых на пластинчатых элементах 1, 3 положительных электрических зарядов и размещённых на пластинчатых элементах 2, 4 отрицательных электрических зарядов для фокусировки электронов сформирован электрический барьер такой высоты, и электрическую напряжённость поддерживается на таком уровне, когда пучок электронов остаётся на орбите. Радиус орбиты электронов определяется положением электрического барьера в пространстве, при достаточной величине электрического барьера.

Схема линзы дана на рисунке 7.

На рисунке 8 изображены траектории электронов в электромагнитной фокусирующей линзе.

Поперечное сечение кольцевой электромагнитной линзы симметричное. Симметричный кольцевой электромагнит с острыми кольцевыми наконечниками полюсов создает в малой области пространства сильное неоднородное магнитное поле. Неоднородное магнитное поле фокусирует электроны, летящие вдоль воображаемой оси через неоднородное магнитное поле.

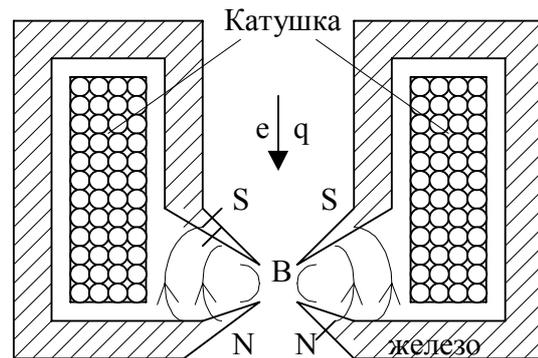


Рисунок 7 – Сечение фокусирующей линзы

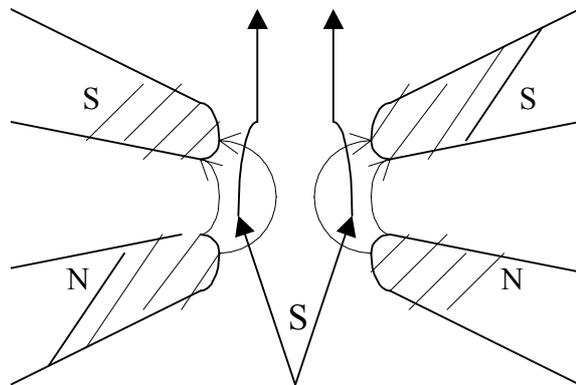


Рисунок 8 – Увеличенное изображение области вблизи наконечников полюсов линзы и траектории электронов в линзе

Механизм фокусировки потока электронов в пучок с помощью силы Лоренца поясняется увеличенным изображением области вблизи наконечников полюсов. Два электрона a и b покидают источник S под некоторым углом к оси линзы. Как только электрон «а» достигнет начала магнитного поля, горизонтальная компонента силы Лоренца вначале отклонит электрон в направлении от вас. Электрон приобретет боковую скорость и, пролетая через сильное вертикальное поле, получит дополнительный импульс силы Лоренца в направлении к оси линзы. Боковое движение создаётся магнитной силой и снимается, когда электрон покидает поле, так что окончательным эффектом будет импульс, направленный к оси линзы, плюс «вращение» относительно оси линзы. На электрон b действуют те же силы, в том числе сила Лоренца, но в противоположном направлении, поэтому электрон тоже отклоняется по направлению к оси фокусирующей линзы. На рисунке показано, как, ранее расходящиеся в различных направлениях, электроны теперь собираются в пучок параллельно летящих электронов. Действие фокусирующего устройства на пролетающие электроны подобно дейст-

вию оптической линзы на свет. Если на пути электронов поставить еще одну такую же линзу, то она сфокусирует электроны снова в одну точку и вверху получится изображение S' источника S .

Электромагнитная линза, изображённая на рисунке 9, выполнена в виде токопроводящего раструба с криволинейными образующими, снабжённого продольной щелевой прорезью, с широкой частью, размещающейся у ускоряющего анода, и узкой частью, размещающейся у изделия. Вдоль раструба протекает постоянный по направлению электрический ток, формирующий магнитное поле с магнитным барьером для фокусировки электронов. Магнитным барьером является повышенное значение магнитной индукции вокруг магнитной линзы. Магнитная линза изготовлена из проводящего электрический ток материала. Магнитная линза имеет переменный по длине диаметр, изменяющийся в соответствии с усреднённой орбитой фокусируемых электронов. Магнитная линза и продольная щелевая прорезь в ней обеспечивают высокую фокусировку. Ускоряющий анод установлен около широкой части магнитной линзы вдоль щелевой прорези.

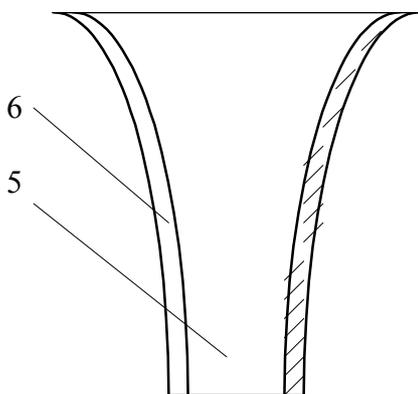


Рисунок 9 – Электромагнитная фокусирующая линза без катушек

Для формирования магнитного поля с магнитным барьером необходимо подать электрический ток вдоль магнитной линзы. Положительный электрический потенциал при этом подаётся на широкий конец магнитной линзы, где вводятся электроны. Отрицательный потенциал подаётся на узкий конец магнитной линзы, из которого выводятся электроны. Распределение индукции по радиусу магнитной линзы в зоне фокусировки электронов таково, что получается поле с барьером магнитной индукции. С помощью магнитного барьера поля магнитной линзы осуществляется фокусировка луча.

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №4 2004

Фокусирующая линза устройства для электронно-лучевой сварки работает следующим образом. Из катода через отверстие электрода при катоде электроны вытягиваются электрическим полем между катодом и анодом и затем поступают в магнитную линзу. В магнитной линзе пучок электронов фокусируется магнитным барьером, расположенным в провале магнитного поля вдоль щелевой прорези. Электроны подвержены воздействию силы Лоренца и не проходят через магнитный барьер. Электроны не пропускаются магнитным барьером и отклоняются магнитным полем на траекторию движения вдоль магнитного барьера. Электроны следуют по траектории, которую определяет протяжённый магнитный барьер, вдоль щелевой прорези к свариваемому изделию. Магнитный барьер магнитного поля, расположенный вдоль широкой части магнитной линзы, легко держит электроны на орбите. По мере движения лёгкие заряженные частицы попадают в область магнитного поля с большими значениями магнитной индукции и всё надёжнее удерживаются магнитным барьером. Важнейшей особенностью магнитной линзы является отсутствие катушек. Это стало возможно потому, что выполнение магнитной линзы в виде токопроводящего раструба с криволинейными образующими, позволило сформировать магнитный барьер магнитного поля. После магнитной линзы электроны поступают к свариваемому изделию. Перемещение луча электронов по свариваемому изделию осуществляется незначительным поворотом магнитной линзы позволяющей устанавливать луч точно по линии сварки.

Предлагаемое изобретение, по сравнению с известными техническими решениями в этой области, повышает фокусировку пучка электронов, происходящую при размещении ускоряющего анода у широкой части раструба и создании сильного магнитного поля, индуцированного малогабаритной магнитной линзой в виде раструба; позволяет снизить энергопотребление во время фокусировки вследствие использования малогабаритной неэнергоёмкой магнитной линзы; позволяет уменьшить габариты устройства, т.к. во-первых, максимальная фокусировка достигается на малой длине магнитной линзы, во-вторых, не требуется применение громоздких электромагнитов магнитной линзы. При использовании предлагаемого изобретения уменьшаются материальные и финансовые затраты на изготовление и эксплуатацию устройства для электронно-лучевой сварки.