

УДК 621.791.01

Д.Ю. Шмельков¹, А.И. Поздышев¹, Е.А. Пигалова², Н.А. Курников²**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА КАК ОДИН ИЗ ВИДОВ СВАРКИ НАПРАВЛЕННЫХ НА СНИЖЕНИЕ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева¹,
ОАО НАЗ «Сокол»²

Рассмотрены вопросы применения электронно-лучевой сварки. Приведена схема и методика работы оборудования для электронно-лучевой сварки. Указаны типы соединений этого способа сварки.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, сварная конструкция, электронный луч.

Широкое применение новых конструкционных материалов на основе тугоплавких и высокоактивных металлов (титана, циркония, молибдена, вольфрама и др.) потребовало создания способа их обработки источником тепла с высокой плотностью энергии в условиях защиты от взаимодействия с газами воздуха (кислородом, азотом). Наиболее полно этим условиям отвечает электронно-лучевая технология.

Сущность электронно-лучевой обработки материалов состоит в использовании кинетической энергии пучка электронов, движущихся в вакууме без столкновений с остаточными молекулами воздуха. При бомбардировке электронами поверхности обрабатываемого материала подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в тепловую, которая и используется для обработки. Электронно-лучевая технология широко применяется в промышленности для плавки и переплава металлов и сплавов, с целью их очистки от вредных примесей и газов, а также для сварки, разделительной резки и пайки.

При электронно-лучевой сварке кинетическая энергия пучка электронов используется для расплавления стыка примыкающих друг к другу деталей и образования сварного шва. Формирование сварного шва (рис. 1) имеет ряд особенностей, обусловленных испарением свариваемого материала и силовым воздействием давления отдачи пара на расплавленный металл. Давление этой отдачи на 3...5 порядков превышает давление электронного луча.

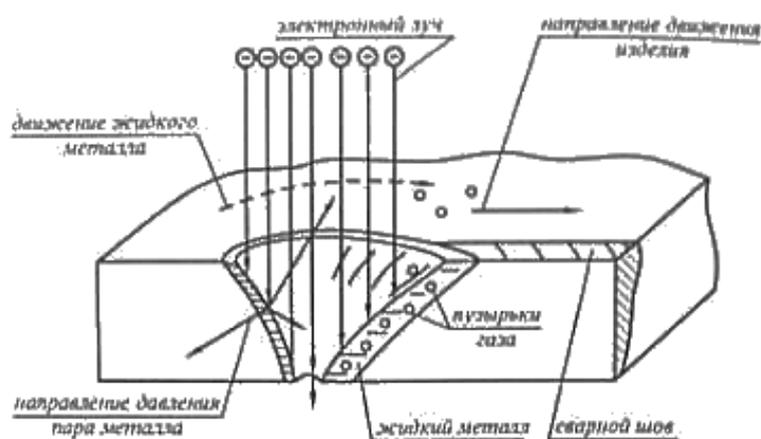


Рис. 1. Схема формирования сварного шва при электронно-лучевой сварке

При определенном значении плотности и достаточной общей мощности электронного луча в сварочной ванне образуется канал-кратер, который может распространяться на всю толщину свариваемого материала, как и при сварке лучом лазера. Перемещение свариваемо-

го изделия или электронного луча приводит к периодическому переносу жидкого металла из зоны плавления в зону кристаллизации при непрерывном воздействии электронного пучка на свариваемый материал. Образование кратера на всю глубину проплавления позволяет получить исключительно малый объем сварочной ванны и, следовательно, минимальные деформации свариваемых изделий. Применение высоких скоростей сварки обеспечивает минимальное термическое воздействие на свариваемый материал в околошовной зоне, а высокие скорости кристаллизации (при эффективном теплоотводе) получение высоких механических свойств сварного соединения.

Технологические параметры электронно-лучевой сварки (табл. 1) – это ускоряющее напряжение U , кВ; скорость сварки $V_{св}$, м/ч; сила тока луча I_l , мА; сила тока магнитной фокусирующей линзы I_m , мА. Последний определяет диаметр пятна воздействия электронов на изделие. Изменением скорости сварки можно регулировать скорость кристаллизации металла сварного шва и термическое воздействие на основной металл в околошовной зоне.

Таблица 1

Режимы электронно-лучевой сварки некоторых конструкционных материалов

Свариваемый металл	Толщина кромок, мм	Режим сварки			Ширина шва, мм
		Ускоряющее напряжение, кВ	Сила тока луча, А	Скорость сварки, м/ч	
Вольфрам	0,5	18...20	40...50	60	1,0
Вольфрам	1,0	20...22	75...80	50	1,5
Тантал	1,0	20...22	50	50	1,5
Сталь Х18Н9	1,5	18...20	50...60	60...70	2,0
Сталь Х18Н9	20	20...22	270	50	7,0
Сталь Х18Н9	35	20...22	500	20	7,0
Молибден+вольфрам	0,5+0,5	18...20	45...50	35...50	1,0

При электронно-лучевой сварке применяют типы соединений, традиционные для сварки плавлением, и новые, присущие только этому способу (рис. 2). Общие требования ко всем типам соединений - это высокая точность сборки деталей перед сваркой. Допустимые зазоры в свариваемых стыках не должны превышать 0,2 мм. При электронно-лучевой сварке требуется более тщательная очистка свариваемых кромок от различных загрязнений, особенно от органических веществ.

Воздействие электронного луча на жидкий металл приводит к микровзрывам в вакууме, в результате чего часть металла сварочной ванны разбрызгивается, поверхность шва становится неровной, в шве могут возникнуть дефекты.

Для электронно-лучевой сварки предпочтительны стыковые соединения, так как в этом случае удается получать узкие сварные швы с минимальной деформацией изделий. Сварка с отбортовкой кромок на телах вращения применяется чаще в приборостроении. Изделия, значительно различающиеся по толщине (например, приварка мембраны к корпусу), сваривают с предварительной обработкой кромки большей толщины для выравнивания температурного поля, что обеспечивает симметричное проплавление деталей. Соединения внахлестку широко применяют при сварке разнородных металлов, различающихся по температуре плавления. Электронный луч в этом случае смещают на более тугоплавкую кромку.

Возможность сварки в узких разделках и труднодоступных местах является одним из преимуществ электронно-лучевой сварки. Это достигается благодаря малым размерам сечения электронного луча и его автономности по отношению к свариваемому изделию. Однопроходная сварка нескольких расположенных друг над другом стыков может быть выполнена проникающим лучом, а в некоторых конструкциях соединение двух оболочек может быть осуществлено через ребро жесткости.

Также электронно-лучевой сварка - это один из видов сварки, направленный на снижение сварочных деформаций. Практически исследована усадка элементов сварной авиационной конструкции. Толщина конструкции - 48 мм, длина - 1500 мм, линейная усадка составляет 0,5 мм.

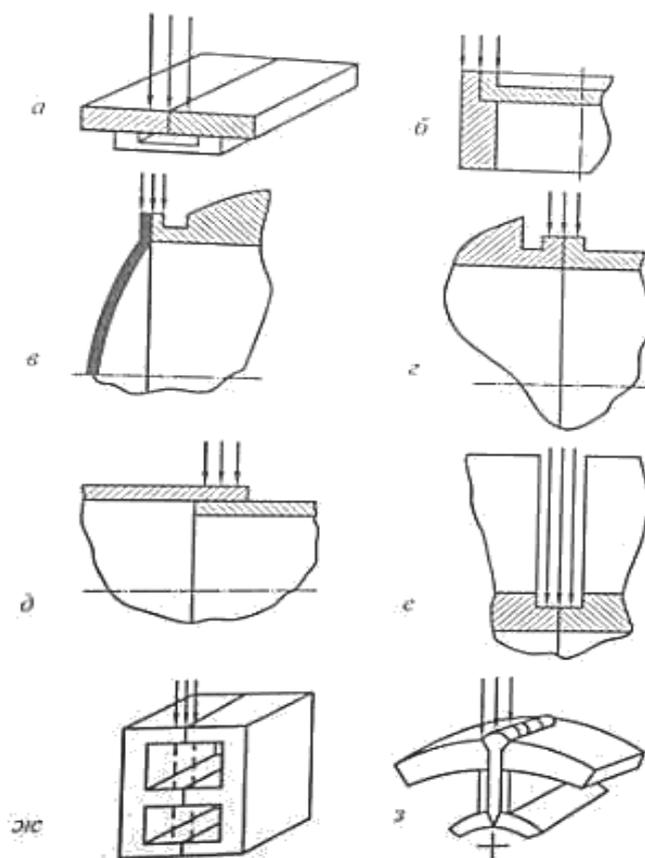


Рис. 2. Типы соединений:

a – встык тонколистовых деталей на подкладке и без нее; *б* – с отбортовкой кромок; *в, г* – с различной толщиной кромок; *д* – внахлест; *е* – в узких разделках и труднодоступных местах; *жс* – однопроводная сварка одновременно нескольких стыков проникающим лучом; *з* – сварка двух цилиндров электронным лучом через ребро жесткости

Основным узлом установки для электронно-лучевой сварки является электронно-лучевая пушка с системами электропитания и управления, формирующая электронный луч (рис. 3). Источником электронов в пушке является катод *1*, изготавливаемый из металлов с малым значением работы выхода электронов, допускающих нагрев до высокой температуры при сравнительно низкой скорости испарения. Наиболее полно этим требованиям отвечают вольфрам и тантал. В некоторых конструкциях сварочных пушек применяют катоды косвенного нагрева, изготовленные из лантаноборидных соединений (например, LaB6), нагреваемые специальным источником тепла. Они обладают лучшими эмиссионными характеристиками по сравнению с металлическими катодами.

Температура катода должна быть такой, чтобы сила тока эмиссии была несколько больше, чем сила тока электронного пучка. Для этого при фиксированном значении ускоряющего напряжения выбирается такая сила тока накала катода, дальнейшее повышение которой не приводит к заметному повышению силы тока луча.

Прикатодный электрод *2* и ускоряющий электрод (анод) *3* создают условия для электростатической фокусировки и разгона электронов под действием ускоряющего напряжения *U*. Расходящийся затем под действием кулоновских сил электронный луч *9* фокусируется магнитной линзой *б*, на фокусном расстоянии от которой размещается свариваемое изделие

8. Система отклонения электронного луча 7 состоит из четырех, реже шести, электромагнитов и служит для управления процессом сварки, настройки электронного луча на свариваемый стык, сообщения лучу колебательных движений по заданной программе.

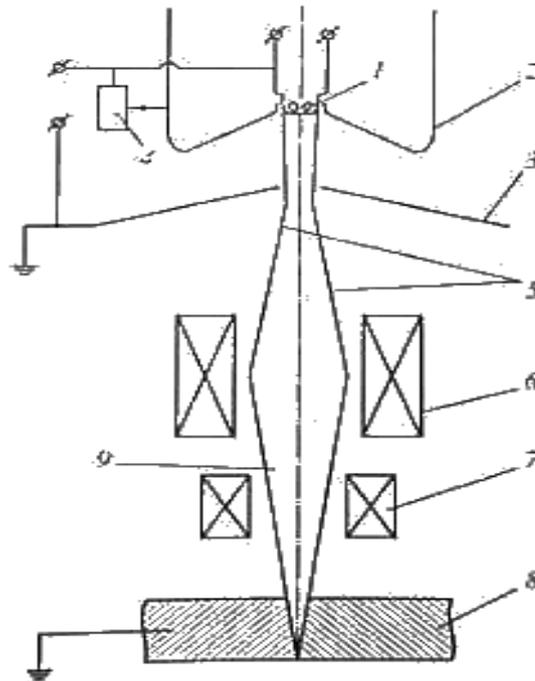


Рис. 3. Схема электроннолучевой пушки:

1 - катод; 2 - прикатодный электрод; 3 - ускоряющий электрод; 4 - потенционер электростатической фокусировки; 5 - траектория движения крайних электронов в луче; 6 - фокусирующая магнитная линза; 7 - система отклонения луча; 8 - свариваемое изделие; 9 - электронный луч

В сварочных установках (рис. 4) электронно-лучевая пушка, 1 соединенная с источником питания 2, встраивается в вакуумную камеру 5, изготавливаемую, как правило, из коррозионно-стойкой стали. Форма камеры и толщина ее стенок должны обеспечивать устойчивость камеры под действием атмосферного давления и надежную защиту сварщика от рентгеновского излучения. Размеры сварочной камеры определяются габаритами свариваемых изделий 5. Для загрузки и выгрузки изделий камеру оснащают крышкой-люком 4 с разъемными уплотнениями из вакуумной резины. Для наблюдения за настройкой электронного луча 6 на свариваемый стык и за процессом сварки камера снабжена смотровым окном 7. Внутреннюю поверхность камеры полируют для снижения количества остаточных газов. Вакуумная система установки состоит из высоковакуумного пароструйного насоса 8 форвакуумного механического насоса 9, системы трубопроводов и вентилях 11, а также приборов для контроля остаточного давления - вакуумметров. Вакуумная система должна поддерживать в рабочем объеме камеры разрежение $1 \cdot 10^{-4} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

Для сварки крупногабаритных изделий имеются вакуумные сварочные камеры объемом в десятки кубических метров. По мере увеличения габаритов сварочных камер возрастает и время, необходимое для создания нужного разрежения. Кроме того, изготовление таких камер требует расхода большого количества дорогостоящих материалов, что значительно повышает стоимость установок. Поэтому ведутся интенсивные работы по созданию малогабаритных стационарных и передвижных вакуумных камер, обеспечивающих необходимое разрежение только в местах сварки. К большим достижениям при создании передвижных вакуумных сварочных камер следует отнести использование для подвижных вакуумных уплотнений ферромагнитных жидкостей, густеющих, даже твердеющих, под действием магнитного поля.

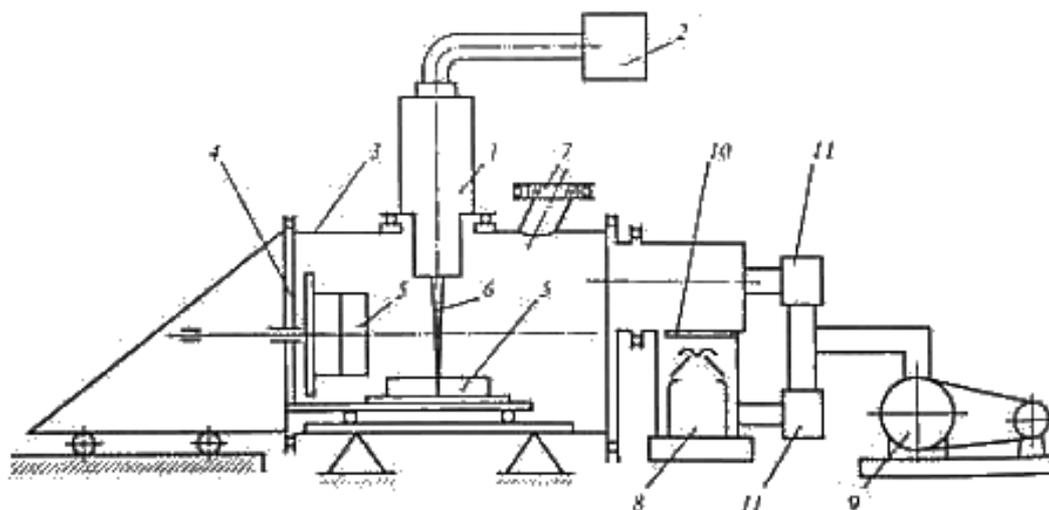


Рис. 4. Схема установки для электронно-лучевой сварки:

1 – электронно-лучевая пушка; 2 – источник питания; 3 – вакуумная камера; 4 – крышка-люк; 5 – свариваемые изделия; 6 – электронный луч; 7 – смотровое окно; 8 – высоковакуумный пароструйный насос; 9 – форвакуумный механический насос; 10 – заслонка; 11 – система трубопроводов и вентилей

Выводы

Технология электронно-лучевой сварки достигла новых высот, но развитие продолжается до сих пор. Электронно-лучевая сварка удовлетворяет потребности современных отраслей промышленности, таких как единичное производство, высокое качество авиационной промышленности, а также массового производства, ориентированного на автомобильную промышленность. Различные типы сварочных электронно-лучевых установок развивались в течение многих лет под влиянием рынка для удовлетворения конкретных потребностей как с технической, так и с экономической точек зрения. Электронно-лучевая сварка – это надежный процесс.

Электронно-лучевой сваркой можно выполнить соединения из таких материалов, как высоколегированные, низколегированные стали, алюминиевые, магниевые, никелевые сплавы, а также сплавы на основе кобальта.

Библиографический список

1. **Винокуров, В.А.** Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
2. **Назаренко, О.К.** Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко, Е.И. Истомин, В.Е. Локшин. – М.: Машиностроение, 1985. – 127 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.02.2015*

D. Yu. Shmelkov¹, A.I. Pozdyshev¹, E.A. Pigalova², N.A. Kurnikov²

ELECTRON-BEAM WELDING AS ONE OF THE TYPES OF WELDING AIMED AT REDUCING THE WELDING DEFORMATION

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev¹,
JSC NAP Sokol²

The article deals with problems of application of electron beam welding. Methods of equipment operation and connection types inherent to this welding mode are given.

Key words: electron beam welding, welded construction, electron beam.