**Electron beam welding (EBW)**

Electron beam welding (EBW) is a fusion welding process in which a beam of high-velocity electrons is applied to the materials being joined. The workpieces melt as the kinetic energy of the electrons is transformed into heat upon impact, and the filler metal, if used, also melts to form part of the weld. The welding is often done in conditions of a vacuum to prevent dispersion of the electron beam. The process was developed by German physicist Karl-Heinz Steigerwald, who was at the time working on various electron beam applications, perceived and developed the first practical electron beam welding machine which began operation in 1958.[1]

Operation

As the electrons strike the workpiece, their energy is converted into heat, instantly vaporizing the metal under temperatures near 25,000 °C. The heat penetrates deeply, making it possible to weld much thicker workpieces than is possible with most other welding processes. However, because the electron beam is tightly focused, the total heat input is actually much lower than that of any arc welding process. As a result, the effect of welding on the surrounding material is minimal, and the heat-affected zone is small. Distortion is slight, and the workpiece cools rapidly, and while normally an advantage, this can lead to cracking in high-carbon steel. Almost all metals can be welded by the process, but the most commonly welded are stainless steels, superalloys, and reactive and refractory metals. The process is also widely used to perform welds of a variety of dissimilar metals combinations. However, attempting to weld plain carbon steel in a vacuum causes the metal to emit gases as it melts, so deoxidizers must be used to prevent weld porosity.[2] Electron Beam Welding is a very similar process to laser beam welding, except that electrons are focused instead of photons in the case of lasers. The advantage of using an electron beam is that the beam does not have a tendency to diverge as laser beams do when they contact the workpiece. Some of the uses of EB welding include making aerospace and automotive parts, as well as semiconductor parts and even jewelry.

The amount of heat input, and thus the penetration, depends on several variables, most notably the number and speed of electrons impacting the workpiece, the diameter of the electron beam, and the travel speed. Greater beam current causes an increase in heat input and penetration, while higher travel speed decreases the amount of heat input and reduces penetration. The diameter of the beam can be varied by moving the focal point with respect to the workpiece—focusing the beam below the surface increases the penetration, while placing the focal point above the surface increases the width of the weld.[2]

The three primary methods of EBW are each applied in different welding environments. The method first developed requires that the welding chamber be at a hard vacuum. Material as thick as 15 cm (6 in) can be welded, and the distance between the welding gun and workpiece (the stand-off distance) can be as great as 0.7 m (30 in). While the most efficient of the three modes, disadvantages include the amount of time required to properly evacuate the chamber and the cost of the entire machine. As electron beam gun technology advanced, it became possible to perform EBW in a soft vacuum, under pressure of 0.1 torr. This allows for larger welding chambers and reduces the time and equipment required to attain evacuate the chamber, but reduces the maximum stand-off distance by half and decreases the maximum material thickness to 5 cm (2 in). The third EBW mode is called non-vacuum or out-of-vacuum EBW, since it is performed at atmospheric pressure. The stand-off distance must be diminished to 4 cm (1.5 in), and the maximum material thickness is about 5 cm (2 in). However, it allows for workpieces of any size to be welded, since the size of the welding chamber is no longer a factor.[2] A schematic drawing may be helpful. [1]

Equipment

The electron beam gun used in EBW both produces the electrons and accelerates them, using a hot cathode emitter made of tungsten that emits electrons when heated. (Steigerwald also experimented with tantalum filaments because of the lower work function). The electrons are then accelerated to a hollow anode inside the gun column by means of a high voltage differential. They pass through the anode at high speed (approx 1/2 the speed of light) and are then directed to the workpiece with magnetic forces resulting from focusing and deflection coils. These components are all housed in an electron beam gun column, in which a hard vacuum (about 0.00001 torr) is maintained.[2]

The EBW power supply pulls a low current (usually less than 1 A), but provides a voltage as high as 60 kV in low-voltage machines, or 200 kV in high-voltage machines. High-voltage machines supply a current as low as 40 mA, and can provide a weld depth-to-width ratio of 25:1, whereas the ratio with a low-voltage machine is around 12:1. The beam power of a power supply is an indicator of its ability to do work, and determines the power density (generally 40-4000 kW/cm² or 100-10,000 kW/in²).[2]

For the hard vacuum and soft vacuum EBW methods, the welding chamber used must be airtight and strong enough to prevent it from being crushed by atmospheric pressure. It must have openings so that the workpieces can be inserted and removed, and its size must be sufficient to hold the workpieces but not significantly larger, as larger chambers require more time to evacuate. The chamber must also be equipped with pumps capable of evacuating it to the desired pressure. For a hard vacuum, a diffusion pump is necessary, while soft vacuums can often be obtained by less costly equipment.[2]

Electron beams can also be sent from their vacuum column through membrane or plasma window for a short distance into the air and this is used for production welding, for example welding the hard teeth of hacksaw blades onto a tougher backing steel. The plasma window is a relatively recent advance which has turned this kind of EBW into a far more practical tool. Previously the vacuum containment membranes were expensive and degraded quickly by the constant stream of high energy electrons.

**Электронно-лучевая сварка (ЭЛС)**

Электронно-лучевая сварка – это сварка плавлением, при которой на свариваемые материалы воздействует поток высокоскоростных электронов. Плавка происходит за счет преобразования кинетической энергии электронов в тепловую при взаимодействии с материалом; используемый присадочный материал также расплавляется, становясь частью сварочного шва. Электронно-лучевая сварка часто производится в вакууме, что бы избежать рассеивание потока электронов. Этот процесс был открыт немецким физиком Карлом-Хайнцем Штейгервальдом, который работал одновременно с несколькими проектами по применению электронного луча; он разработал и создал первый работающий образец электронно-лучевого сварочного аппарата в 1958 году.

Сущность процесса

Как только электроны взаимодействуют с поверхностью материала, происходит преобразование их кинетической энергии в тепловую, вызывая мгновенное испарение метала при температуре около 25000°С. Выделение теплоты происходит достаточно глубоко, что дает возможность сваривать более тонкие заготовки, чем при большинстве других методов. Однако, из-за плотной фокусировки потока электронов общее выделение теплоты значительно ниже, чем при любом дуговой сварке. В результате тепловое воздействие на окружающий сварочный шов материал минимальное и зона нагрева мала. Искажение потока электронов незначительно, заготовка остывает быстро, и хотя обычно это считается преимуществом, быстрое остывание может вызвать растрескивание высокоуглеродистой стали. При помощи ЭЛС можно производить сварку практически любых металлов, но обычно распространена сварка нержавеющих сталей, сверхпрочных сплавов, химически активных и тугоплавких металлов. Так же процесс ЭЛС широко используется при сварке разнородных металлов. Однако, при попытки сварки обычной углеродистой стали в вакууме, было обнаружено, что при плавлении происходит выделение газов из металла, а следовательно, должны применятся раскислители для предотвращения образования пористости металла. Электронно-лучевая сварка очень похожа на процесс лазерной сварки – единственное существенное отличие в этих двух процессах это то, что вместо фотонов на металл воздействуют электроны. Преимущество использования электронно луча заключается в том, что он, в отличие от лазерного луча, не предрасположен к отклонению при контакте с заготовкой. Примеры применения ЭЛС включают использование ее при изготовлении деталей аэрокосмической и автомобильной промышленностей, а также при производстве полупроводников и даже в ювелирном деле.

Количество выделяющегося тепла, а следовательно, глубины его проникновения, зависит от нескольких переменных, наибольшее влияние оказывают количество и скорость электронов, взаимодействующих с заготовкой, диаметр электронного луча и скорость его перемещения по поверхности. Больший ток пучка вызывает увеличение выделения тепла и глубину проникновения, тогда как его бОльшая скорость движения по поверхности наоборот сокращает эти параметры. Диаметр пучка может регулироваться посредством перемещения фокусной точки по отношению к заготовке – фокусировка луча ближе к поверхности вызовет увеличение глубины проникновения тепла, тогда как фокусировка дальше от поверхности вызовет увеличение ширины сварки.

Всего существует три основных метода электронно-лучевой сварки, каждый из которых должен проводиться в особых условиях. Метод открытый первым требует высокого вакуума в рабочей камере. Этот метод позволяет сваривать материал толщиной до 15 см, а расстояние между сварочным пистолетом и заготовкой (дистанция удаления) может достигать 0,7 м. Хотя это метод является наиболее эффективным из всех трех, его недостатками является достаточно большие временные затраты на подготовку высокого вакуума в камере, а также стоимость всей установки.

С усовершенствованием технологии электронной пушки стало возможным проводить электронно-лучевую сварку в низком вакууме (при давлении около 0,1 Торр). Это позволило увеличить размеры рабочей камеры и сократить время и количество оборудования на ее подготовку, но это также сократило дистанцию удаления наполовину и максимальную толщину заготовки до 5 см. Третий метод ЭЛС называется без-вакуумная электронно-лучевая сварка, так как осуществляется при атмосферном давлении. Дистанцию удаления при этом не должна превышать 4 см, а толщина заготовки – 5 см. однако, данный метод позволят производить сварку заготовок практически любых размеров, т.к. размеры рабочей камеры больше не являются ограничителем.

Оборудование

Электронно-лучевая пушка, применяемая в ЭЛС, одновременно создает и разгоняет электроны, используя горячий катод, изготовленный из вольфрама, который при нагреве начинает испускать электроны (Штейгервальд также проводил эксперименты с танталовыми нитями, т.к. им требуется меньшая температура для работы). После эмиссии электроны разгоняются и попадают в полый анод, находящийся внутри пушки, посредством большой разницы напряжений. Электроны проходят через анод на высокой скорости (равняющейся приблизительно половине скорости света) и направляются на заготовку магнитными полями отклоняющих катушек. Все эти компоненты расположены в стойке электронно-лучевой пушки, так же в ней поддерживается сверхвысокий вакуум (около 0,00001 Торр).

Система питания установки для ЭЛС потребляет ток силой менее чем 1 А, но требует напряжения порядка 60 кВ в низковольтных установках или 200 кВ в высоковольтных установках. Высоковольтные установки могут потреблять ток силой до 40 мА и обеспечивать соотношение глубина-ширина сварки 25:1, тогда как соотношение в низковольтных установок составляет примерно 12:1. Зависящая от удельной мощности системы питания мощность пучка – показатель способности выполнять сварку (обычно она составляет 40-40000 кВт/см2).

Рабочая камера, используемая в методах ЭЛС с высоким и низким вакуумом, должна быть достаточно герметична и прочна, чтобы выдержать воздействие атмосферного давления. Она должна каким-то образом открываться, что бы в нее можно было поместить и убрать заготовки, а так же ее размеры должны быть достаточны для заготовок, но не слишком большими, т.к. большая камера требует большее время для откачки воздуха. Так же камера должна снабжаться насосами для создания необходимого вакуума. Высокий вакуум требует применения диффузионных насосов, тогда как низкий вакуум может быть достигнут и при использовании не столь дорогостоящего оборудования.

Электронный луч так же может использоваться при атмосферном давлении на коротких расстояниях, проходя через мембрану или плазменное окно; данный метод для высокопроизводительной сварки, например приваривании твердых зубьев ножовочной пилы к более мягкой основе. Плазменное окно, разработанное относительно недавно, дало толчок к большему распространению ЭЛС. Мембраны, используемые до этого, были более дорогостоящими и изнашивались быстрее из-за постоянного воздействия потока высокоскоростных электронов.