

ние тока фокусировки в процессе сварки, но и получать сварные швы с заданной геометрией.

Литература

1. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник / Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н., М., 1985. 496 с.
2. Беленький В.Я., Язовских В.М. Контроль электронно-лучевой сварки с использованием плазмен-

ных явлений в области сварочной ванны // Сварочное производство, 1997. - №1, С.7-9.

3. Язовских В.М., Беленький В.Я., Кротов Л.Н. Информационно-измерительная система контроля технологических параметров электронно-лучевой сварки на базе компьютера IBM PC/AT// Сварочное производство, 1996. - N 2, С.22-23.

V.M.Yazovskykh, V.Ya.Belenky, L.N.Krotov, A.A.Sigaev

Effect of Electron Beam Modulation on Electron-Beam Welded Joint Formation.

Peculiarities of electron-beam-welded joint formation with use of electron beam power modulation investigated. Nature of the electron beam - metal interaction at modulated-beam welding was studied with use of computer information-measuring system. The signals from charged particles collector placed above the welding zone were processed, and mathematical models of weld geometrical parameters dependence of modulation characteristics were established. The use of optimized modulated electron beam allows to obtain welds with specified geometrical parameters.

© В.М.Язовских, В.Я.Беленький, Л.Н.Кротов, А.А.Сигаев, 1999.

УДК 621.791.85

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

И.Л. Поболь, В.М. Голуб, И.Г. Нестерук

Физико-технический институт НАНБ, г. Минск, Республика Беларусь

Изучено влияние параметров процесса ЭЛС на глубину сварного шва: мощности луча в диапазоне 2,7-5,4 кВт, скорости относительного перемещения зоны электронно-лучевого нагрева и детали - 5-20 мм/с, тока фокусировки - 705-755 мА. Установлено, что имеет место экстремальная зависимость глубины сварного шва от тока фокусировки. При этом глубина шва достигает 10-15 мм. При увеличении скорости относительного перемещения зоны нагрева и детали глубина сварного шва уменьшается. В работе изучены методы изготовления с применением ЭЛС деталей типа шестерен и первичных валов коробки передач автомобиля КамАЗ и разработаны соответствующие технологические процессы.

Введение

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) - это процесс соединения материалов путем их расплавления в месте стыка, при котором источником тепла является электронный луч с большой удельной мощностью. Методы ЭЛС принадлежат к высоким технологиям.

Электронно-лучевая сварка нашла широкое применение в авиации, машиностроении, инструментальном производстве и других отраслях во всех промышленно развитых странах мира. Основными преимуществами ЭЛС являются следующие ее особенности [1-3]:

- чистота процесса, проводящегося в основном в условиях вакуума;
- малый объем расплавляемого металла;
- кратковременность процесса;
- большое отношение глубины сварного шва к его ширине.

ЭЛС позволяет соединять за один проход металлы и сплавы различной толщины. Малый объем литого металла и кратковременность теплового воздействия обеспечивают незначительные термические деформации соединяемых деталей.

Основными направлениями развития ЭЛС в мире являются повышение качества и надежности сварных соединений (что ведет к расширению областей применения) и снижение инвестиционных и эксплуатационных затрат на подготовку производства и реализацию технологий.

В настоящее время ощущается потребность промышленных предприятий Беларуси в применении технологий ЭЛС для повышения конкурентоспособности их продукции. Однако по ряду причин эти технологии развиваются на ограниченном количестве предприятий (МТЗ, СП «Сандвик Бисов»).

В отличие от этих предприятий, для которых оборудование изготавливалось только под сварку определенных видов изделий (ряда типов шестерен и биметаллических ленточных пил), в распоряжении Физико-технического института НАН Б имеется универсальная установка для ЭЛС на базе энергоблока ЭЛА-15 с мощностью луча до 15 кВт. Она позволяет производить сварку разнообразных типов деталей из различных металлов и их сплавов. При этом глубина проплавления при сварке стали достигает нескольких десятков миллиметров, а отношение глубины проплавления к ширине шва - 10/1-20/1.

В работе изучены методы изготовления с применением ЭЛС деталей типа шестерен и первичных валов коробки передач автомобиля КамАЗ и разработаны соответствующие технологические процессы.

1. Удельная мощность. Активная зона

Параметром, наиболее существенным для проведения всех термических процессов с использованием лучевых источников воздействия, в том числе сварки, является удельная мощность q в зоне взаимодействия луча с материалом. Она определяется следующим образом:

$$q = I \cdot U / S, \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где I - ток луча, А; U - ускоряющее напряжение, В; S - площадь поперечного сечения потока электронов, м².

Условием, необходимым для реализации процесса сварки, является такая величина q в зоне взаимодействия с деталью, чтобы могли произойти явления нагрева, расплавления и глубокого проникновения электронов в материал. Это возможно, когда электроны, ударяющиеся о поверхность металла, расплавляют его и создают в материале канал, обеспечивающий проникновение электронов к его нижней части без заметного рассеяния. Условия глубокого проникновения электронов выполняются в том слу-

чае, когда величина удельной мощности превышает критическое значение $q_{кр}$. Критическая величина $q_{кр}$ описывается зависимостью [2]:

$$q_{кр} = \frac{2\lambda T_{пл}}{r \ln\left(\frac{2,25a}{\sqrt{r}}\right)}, \quad (2)$$

где λ - коэффициент теплопроводности; $a = \lambda/\rho c$ - коэффициент температуропроводности (ρ - плотность, c - теплоемкость) материала; $T_{пл}$ - температура плавления; r - радиус пучка электронов, v - скорость сварки.

Видно, что величина критической удельной мощности зависит от физических свойств материала (λ , ρ , c , $T_{пл}$), скорости перемещения источника тепла и его размеров.

Область луча с величиной плотности энергии, удовлетворяющей условиям глубокого проплавления, называется активной зоной [3]. Размеры активной зоны, ее положение относительно рабочей поверхности и плотность энергии в активной зоне непосредственно влияют на форму канала, создаваемого самим лучом, и геометрию шва.

Для электронного луча с круговой симметрией размеры активной зоны зависят от выражения

$$q(r, 0, z) \geq q_{кр}, \quad (3)$$

а продольный размер l_{az} (вдоль оси z) определяет условие

$$q(0, 0, z) = q_{кр}. \quad (4)$$

Глубина создаваемого канала и, следовательно, форма шва при ЭЛС существенно зависят от максимальной плотности энергии в активной зоне, размеров активной зоны и ее положения относительно рабочей поверхности.

Положение активной зоны (l_{Dmin}) электронного луча относительно поверхности свариваемой заготовки (l_w) должно быть строго определено. Ожидаемая величина отношения l_w / l_{Dmin} получается путем изменения величины тока магнитной фокусирующей катушки (изменением l_{Dmin}) или изменением рабочего расстояния. Эти изменения определяются понятием фокусирования электронного луча.

Фокусирование луча должно быть однозначным (независимо от мощности луча), повторяемым и вести к получению ожидаемых технологических эффектов.

Обычно однако неизвестно, как изменяется положение активной зоны луча при регулировании мощности. В зависимости от типа электронной пушки возрастание мощности луча может вести как к повышению, так и к снижению ее уровня относительно рабочей поверхности.

Существуют технологические приемы выбора оптимального положения активной зоны по глубине и качеству шва. Для получения максимальной глубины проплавления применяют метод пробных расплавлений и метод автоматического регулирования тока фокусирующей катушки.

Первый из них является наиболее достоверным и базовым и имеет целью получение экспериментальных зависимостей глубины сварки S от параметров процесса в материале, предназначенном для ЭЛС, с последующим выбором условий, для которых $S=S_{max}$. Ход характеристик зависимости глубины от расстояния $S = f(L)$ и тока луча $S = f(I)$ зависит от конструкции электронной пушки и технологических параметров.

3. Качество сварного соединения

Правильно проводимый процесс ЭЛС обеспечивает получение бездефектных швов. Каждое нарушение процесса может привести к появлению дефектов, даже в случае сварки хорошо сваривающихся

материалов. Это ведет к снижению качества и надежности соединения.

Методы достижения требуемого качества и надежности сварных соединений при ЭЛС связаны с оптимальным выбором основных параметров сварки. Их выбор основан на знании зависимостей формы и качества сварного шва от условий сварки. Основными методами управления лучом являются следующие:

1. Выбор оптимального положения активной зоны относительно поверхности свариваемой детали.

2. Уменьшение угла сходимости электронного луча путем увеличения рабочего расстояния между электронной пушкой и деталью.

3. Уменьшение удельной мощности электронного луча до величины, необходимой для получения требуемой глубины сварки. Это достигается уменьшением мощности луча или увеличением его диаметра.

4. Снижение скорости сварки, ведущее к более стабильному течению жидкого металла и снижению вероятности образования на задней стенке шва вихревых потоков металла, являющихся причиной образования продольных пор. При малой скорости сварки кристаллизующиеся поверхности сходятся в плоскости симметрии сварного шва под достаточно большим углом, который обеспечивает бездефектное соединение кристаллитов.

Эти методы, особенно первый и последний, определяют качество сварного шва.

4. Оборудование и методика экспериментов

Для проведения исследований, изготовления экспериментальных образцов и опытных партий деталей типа шестерен и валов использовали установку для электронно-лучевой сварки, созданную в ФТИ на базе энергоблока ЭЛА-15 производства Сумского ПО «Сэлми».

Ускоряющее напряжение, используемое в ЭЛА-15, составляет 60 кВ, мощность луча может плавно изменяться от 0 до 15 кВт. Поток электронов может быть сфокусирован до диаметра 1 мм (в этом случае удельная мощность в фокальном пятне достигает 10^7 Вт/см²), расфокусирован до диаметра ~50 мм и развернут с использованием электромагнитной системы в зону любой формы.

Электронно-лучевая сварочная пушка предназначена для создания и формирования потока электронов. Фокусирующе-отклоняющая система предназначена для формирования и отклонения пучка при обработке изделий в состав высоковольтного блока входит источник накала и смещения и высоковольтный трансформатор с выпрямителем и делителем обратной связи.

С помощью блока регулирующей лампы обеспечивается защита источника питания от высоковольтных разрядов в случае резкого повышения остаточного давления в камере пушки и автоматическое повторное включение ускоряющего напряжения в течение 2 мс, что устраняет опасность формирования дефектов в сварном шве.

Для выбора оптимальных условий ЭЛС изучаемых в работе деталей изготавливались образцы из сталей 20ХН3А и 18ХГТ цилиндрической формы диаметром 73 мм (равным диаметру заготовки первичного вала коробки передач) и высотой 30 мм. Проводилось исследование влияния режимов фокусирования луча, мощности и скорости перемещения зоны воздействия на параметры сварного шва.

Образцы поочередно размещались в устройстве вращения в установке ЭЛС на фиксированных расстояниях (327 и 377 мм) от среза электронной пушки. Задавались различные скорости вращения образцов,

что позволило изучить влияние на параметры сварного шва скорости относительного перемещения источника воздействия и детали в широком диапазоне (5-20 мм/с).

На свариваемую заготовку направлялся электронный луч. Мощность луча в различных экспериментах изменялась от 2,7 до 5,4 кВт. Мощность регулировали путем изменения тока луча, ускоряющее напряжение во всех экспериментах было постоянным - 60 кВ. Ток фокусировки изменяли в разных опытах в диапазоне 705-755 мА. Совершался один полный оборот образца с получением на нем замкнутого сварного шва.

После проведения ЭЛС образцы разрезали на отрезном станке с использованием круга 14А6СТВ перпендикулярно сварному шву. Во время разрезания заготовок проводили их непрерывное охлаждение водой для предотвращения перегрева разрезаемой детали. Затем образцы шлифовали, полировали и подвергали травлению для выявления конфигурации зоны соединения. Для травления использовали раствор Марбле (50 мл HCl; 2 г CuSO₄; 50 мл C₂H₅OH; 50 мл H₂O).

5. Влияния параметров сварки на форму сварочной ванны

Изучено влияние места расположения активной области относительно поверхности свариваемой детали. С этой целью образцы размещали на постоянном расстоянии 327 мм от среза электронной пушки. Мощность луча в экспериментах этой серии изменяли от 3,3 до 4,5 кВт, скорость линейного перемещения составляла 12,4 мм/с.

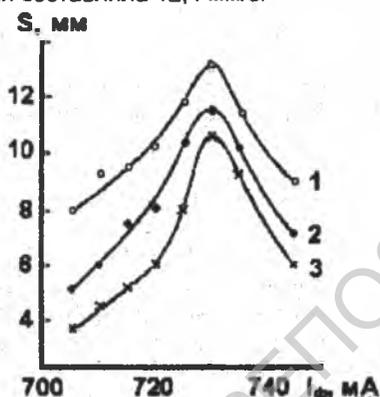


Рис.1. Зависимость глубины сварного шва от тока фокусировки при разных значениях мощности луча: 4,5 кВт (кривая 3), 3,9 (2) и 3,3 кВт (1).

На рис. 1 приведены зависимости глубины сварного шва от тока фокусировки при прочих постоянных параметрах процесса ЭЛС. Видно, что имеет место четко выраженная экстремальная зависимость глубины сварного шва от места расположения активной зоны по отношению к поверхности свариваемой заготовки. Существует достаточно узкий диапазон значений тока фокусировки (725-735 мА), обеспечивающий получение максимальной глубины проплавления (до 10-13 мм) при различных значениях мощности электронного луча. Именно этот диапазон режима фокусирования следует использовать для проведения процессов ЭЛС.

Влияние мощности луча на глубину проплавления при различных условиях фокусирования показано на рис. 2. В этой серии экспериментов также поддерживались постоянными прочие параметры - расстояние от среза пушки до поверхности свариваемых образцов (327 мм) и скорость перемещения заготовок относительно луча (12,4 мм/с). При использовании различных значений тока фокусировки наблюда-

ется увеличение глубины проплавления при возрастании мощности нагрева. Удаление от оптимальных значений тока фокусировки (кривая 4) приводит к уменьшению глубины проплавления при использовании всех значений мощности. Дальнейшее увеличение тока фокусировки ведет к приближению активной зоны к поверхности образца, т.е. к неблагоприятной тенденции изменения условий процесса ЭЛС.

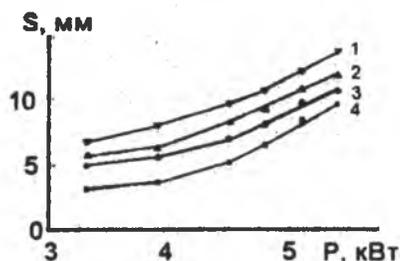


Рис. 2. Зависимость глубины сварного шва от мощности луча при различных значениях тока фокусировки: 725 мА (кривая 1), 730 (2), 735 (3) и 745 мА (4).

Желая получить максимальную глубину проплавления при минимальной ширине сварного шва, следует выбирать положение плоскости, фокального пятна, соответствующее 0,5-0,75 этой глубины. Тогда, при удельной мощности луча, превышающей критическое значение, можно добиться отношения глубины шва к его ширине гораздо больше единицы. Наступает эффект глубокого кинжального проплавления шва. Его невозможно добиться при других способах сварки. Можно сказать, что кинжальный шов (рис. 3) является визитной карточкой ЭЛС.



Рис. 3. Поперечное сечение заготовки первичного вала 15.1701030 коробки передач КамАЗ из стали 20ХН3А со швом, полученным ЭЛС.

Скорость относительного перемещения свариваемого образца и электронного луча также существенно влияет на параметры сварочной ванны. Снижение скорости перемещения, т.е. увеличение времени воздействия пучка электронов на элементарный объем свариваемого материала ведет к повышению глубины шва.

Существенным является то, что при кинжальном проплавлении энергия, израсходованная пучком на единицу длины шва и отнесенная к глубине проплавления, достигает минимума.

6. Металлографические исследования зоны сварного соединения

Применение электронно-лучевой сварки в производственных масштабах требует проведения контрольных испытаний качества изделий неразрушающими методами, а также с разрезанием деталей. В этих целях проводится выборочный контроль сваренных шестерен и заготовок валов путем измерения твердости, металлографических исследований. Особый интерес представляет случай сварки разнородных материалов (различных марок сталей). Так, по условиям производства завода «Аргат» узлы шестерни У35.605-00.180, У35.605-00.190, У35.615-01.200 и др. изготавливаются из сталей 20ХН3А и 25ХГТ, причем ступица и шестерня каждо-

го узла могут быть выполнены из разных марок сталей.

Для проведения металлографических исследований сварного соединения из контрольной шестерни, в которой ступица изготовлена из стали 20ХН3А, а шестерня – из 25ХГТ, вырезали образец, изготавливали макрошлиф поперечного сечения. Металл сварного шва имеет дендритную структуру, состоящую из мелкопластинчатых, вытянутых в направлении отвода тепла, зерен перлита с ферритной сеткой по границам. Поры, микро- и макротрещины отсутствуют. Ширина шва в верхней части составляет 2,8 мм, а в корне - 0,4 мм.

Ширина зоны термического влияния, примыкающей к шву со стороны стали 20ХН3А, небольшая - до 0,6 мм, а со стороны стали 25ХГТ - практически отсутствует. Из-за малых размеров ЗТВ не оказывает неблагоприятного воздействия на прочностные свойства соединения. При нагружении растягивающие напряжения поглощаются прочным металлом.

7. Участок электронно-лучевой сварки

В рамках выполнения задания ГНТП «Сварка» в Физико-техническом институте НАНБ организован производственный участок ЭЛС (в мировой практике такие формы организации получили наименование Job shop). Кроме проведения исследований, накоплен опыт практического сотрудничества с предприятиями Беларуси (ОАО «Амкодор», ПО «Авторемонт», Минским заводом шестерен, Гомельским станкостроительным заводом и др.), испытывающими потребность в применении технологий ЭЛС. На рис. 4 показаны различные детали машиностроения, изготовленные с использованием ЭЛС по заказам перечисленных предприятий.

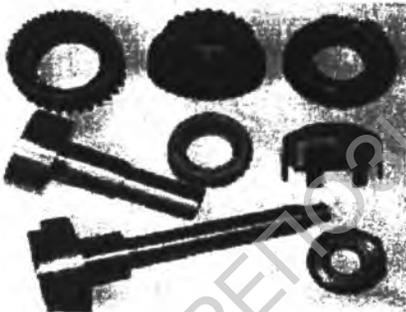


Рис. 4. Примеры деталей, изготовленных совместно с предприятиями Беларуси

Разработан ряд технологических процессов ЭЛС, изготовлено несколько тысяч узлов-шестерен У35.605-00.180, У35.605-00.190, У35.615-01.200 для гидромеханических коробок передач, дорожных строительных машин по заказам завода «Агрегат», а также других изделий.

Благодаря введению в действие с 1.10.1999 г. стандарта /4/, разработанного авторами (первого на территории СНГ стандарта в области ЭЛС), имеется возможность (совместно конструктору, изготовителю

и потребителю продукции еще на стадии проектирования изделия) установления требований к уровню качества сварных соединений в новых узлах, изготавливаемых с использованием ЭЛС. При выборе необходимого уровня качества соединения могут приниматься во внимание конструкция соединения, последующая обработка поверхности, характер напряжений, условия эксплуатации, экономические факторы и др.

Выводы

Наиболее существенным параметром для реализации процесса глубокого кинжального проплавления во время ЭЛС является величина удельной мощности. На форму канала проплавления при ЭЛС влияет взаимное расположение активной зоны источника нагрева и рабочей поверхности. Необходимо отметить, что оптимизацию режимов сварки следует проводить для конкретной электронно-лучевой установки. Это связано с конструктивными особенностями последних.

В ходе исследований изучено влияние параметров процесса ЭЛС на глубину сварного шва: мощности луча в диапазоне 2,7-5,4 кВт, скорости относительного перемещения зоны электронно-лучевого нагрева и детали - 5-20 мм/с, тока фокусировки - 705-755 мА. Установлено, что имеет место экстремальная зависимость глубины сварного шва от тока фокусировки: при расстоянии от среза электронной пушки до поверхности сварки 327 мм оптимальный диапазон тока фокусировки составляет 725-735 мА. При этом глубина шва достигает 10-15 мм. Существенное влияние на параметры сварного шва оказывает скорость относительного перемещения зоны нагрева и детали. При увеличении скорости перемещения глубина сварного шва уменьшается.

В процессе практического сотрудничества с промышленными предприятиями оптимизированы режимы проведения процесса электронно-лучевой сварки различных типов изделий. Опыт сотрудничества убеждает в перспективности технологий ЭЛС, необходимости их развития и внедрения в производство в целях повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой предприятиями Беларуси продукции.

Литература

1. Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии. Киев, НТП «Инкорс», 1998, 232 с.
2. Friedel K. Oddziaływanie wiązki elektronowej na ciało stałe w warunkach głębokiej penetracji. Prac. Nauk. Inst. Technol. Elektron. PWR. 1983. N 27.
3. Arata Y., Isimura T., Miyamoto I. Focusing characteristics of high energy density beam. Trans. of JWRI. 1973. V.2, N1. P.1-6.
4. Сварка электронно-лучевая и лазерная. Соединения сварные. Уровни качества. Государственный стандарт РБ СТБ 1149-99.

I.L.Pobol, V.M.Golub, I.G.Nesteruk

Electron Beam Welding of Mechanical Engineering Parts.

The influence of EBW process parameters on the depth of welding seam such as beam power in the range of 2.7 to 5.4 kW, mutual motion rate of EB heating zone and the part – 5 to 20 mm/s, focusing coil current – 705 to 755 mA is studied. It is established that extreme dependence is observed of the weld depth versus focusing current. The weld depth reaches 10 to 15 mm. The higher mutual motion rate of heating zone and part, the lower weld depth. The methods of production driving gear – type parts and first-motion shafts using EBW are studied and corresponding technologies are developed.

© И.Л. Поболь, В.М. Голуб, И.Г. Нестерук, 1999.