

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.4.13

УДК 621.791

**Т.В. Ольшанская, Е.С. Саломатова**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

## **ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ЛУЧОМ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКЕ**

Рассмотрены современные способы управления электронным лучом при электронно-лучевой сварке. К данным способам относятся: импульсная модуляция тока электронного луча, приводящая к изменению тепловложения; влияние колебательного перемещения фокальной плоскости луча по вертикали (динамическая фокусировка) на формирование сварного соединения при электронно-лучевой сварке; осцилляция луча с различного вида разверткой непосредственно по стыку сварного соединения, приводящая к увеличению площади зоны действия луча; многолучевая (многокановая) сварка, при которой электронный луч сканирует по поверхности изделия с высокой частотой (~ 5 кГц и более) по нескольким точкам от одной к другой и обратно, расположенным друг от друга на расстоянии; многофокусная сварка, приводящая к динамическому синхронному изменению фокуса и отклонению электронного луча в определенную точку. Применение данных методов направлено на устранение специфических дефектов в сварных швах, таких как корневые дефекты (пикообразная глубина проплавления, наличие полостей или несплавлений), протяженные полости в объеме шва, «серединовые» трещины и отклонения шва от стыка из-за остаточных или наведенных магнитных полей. Также возможно проведение сварки сразу в нескольких обрабатываемых зонах, либо проведение сварки с образованием нескольких сварочных ванн, следующих друг за другом, либо совмещение сварки и термообработки. Многолучевая техника может успешно применяться при соединении разнородных материалов, например бронзового венца червячного колеса со ступицей из чугуна или стали, чтобы уменьшить стоимость колеса, а также при сварке других композиций, например меди с вольфрамом или стали с алюминием через медную прокладку.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая сварка, импульсная модуляция тока, электронный луч, фокальная плоскость луча, формирование сварного соединения, осцилляция электронного луча, многокановая сварка, расщепление электронного луча, специфические дефекты, совмещенные сварка и термообработка, разнородные материалы.

**T.V. Olshanskaya, E.S. Salomatova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **REVIEW OF MODERN METHODS OF MANAGEMENT OF THE ELECTRON BEAM WHEN THE ELECTRON-BEAM WELDING**

The article deals with modern methods of controlling an electron beam in electron beam welding. By these methods include pulse modulation of the electron beam current leads to a change in heat input; vibrational impact beam focal plane displacement in the vertical (dynamic focus) weld formation in

electron beam welding; oscillation beam with various scan directly on the junction of the weld joint leads to an increase in the area of the beam action area; multibeam (mnogovannovaya) welding, at which an electron beam is scanned over the surface of the article with a high frequency (about 5 kHz or more) to several points from one to the other and back, each located at a distance from each other; multifocal welding, resulting in a synchronous dynamic change in focus and deflection of the electron beam to a specific point. Application of these methods is aimed at eliminating specific defects in welds, such as root defects (Pointed depth of penetration, the presence of voids or poor fusion), extended cavity in the seam volume, the "middle" crack and seam deviation from the joint due to residual or induced magnetic fields. It is also possible carrying out welding in several treated areas, welding or welding to form a plurality of consecutive baths each other, or a combination of welding and heat treatment. Multipath technique can be successfully used in combination of dissimilar materials, such as bronze worm wheel rim to the hub of the cast iron or steel wheels to reduce the cost, as well as other compositions for welding, for example, copper or tungsten steel with aluminum through a copper gasket.

**Keywords:** electron-beam welding, pulsed current modulation, electron beam, focal plane of the beam, forming weld, oscillation of the electron beam, multipool welding, electron beam splitting, specific defects, combined heat treatment and welding, dissimilar materials.

Электронный луч является практически безынерционным источником тепловой энергии, что не только дает возможность для тонкой регулировки мощности, фокусировки и положения луча на поверхности изделия, но и позволяет осуществлять быстрое управление этими параметрами. Изменения и быстрое управление положением луча на поверхности, его мощностью и фокусировкой могут способствовать тепловым возмущениям в сварочной ванне, изменению плотности тепловой энергии и характера распределения.

Еще до 2000-х гг. были известны и применялись такие методы управления лучом, как импульсная модуляция мощности электронного луча, колебательные перемещения фокальной мощности луча по вертикали и осцилляция луча по траекториям различного вида. Применение данных методов было направлено в основном на устранение специфических дефектов в сварных швах, таких как корневые дефекты (пикообразная глубина проплавления, наличие полостей или несплавлений), протяженные полости в объеме шва, «серединные» трещины и отклонения шва от стыка из-за остаточных или наведенных магнитных полей.

С развитием новых систем управления электронным лучом и программирования режимов сварки значительно расширились возможности совершенствования технологических приемов электронно-лучевой сварки, которые обеспечивают почти неограниченное разнообразие режимов воздействия луча на поверхность обрабатываемой детали (кроме осцилляции луча, многофокусная и многолучевая сварка, комбинированные способы сварки и др.) [1–5].

**Импульсная модуляция** тока электронного луча приводит к изменению тепловложения. В работах [6, 7] показано, что для каждого металла есть свой диапазон частот модуляции тока электронного луча, при котором повышается эффективность процесса электронно-лучевой сварки и, в частности, увеличивается глубина проплавления. Диапазон частот модуляции определяется расчетным методом из условия устранения нежелательного влияния экранировки луча на процесс проплавления. Реализация импульсной модуляции мощности электронного луча осуществляется путем подачи отрицательных импульсов на управляющий электрод триодной электронной пушки. Однако выбор временных параметров модуляции для конкретных режимов сварки и свариваемого материала в каждом отдельном случае затруднен ввиду отсутствия полных данных о колебательных перемещениях луча в канале проплавления. Наиболее широко импульсная модуляция тока луча применяется при сварке малогабаритных тонкостенных изделий с частотой до 400 Гц. Многочисленные попытки применения модуляции тока пучка при сварке металлов средних и больших толщин не нашли широкого применения из-за интенсивного разбрызгивания металла, значительных подрезов с обеих сторон шва.

Влияние колебательного перемещения фокальной плоскости луча по вертикали (**динамическая фокусировка**) на формирование сварного соединения при электронно-лучевой сварке рассмотрено в работах [8, 9]. Теоретическая оценка оптимальной частоты динамической фокусировки луча определила диапазон частот 1–200 Гц. Поскольку для каждого конкретного случая сварки выбор частот сканирования фокуса затруднен, было предложено повысить частоту на один-два порядка с целью получения некоторого аналога параллельного электронного луча. Однако осцилляция уровня фокусировки луча равнозначна пульсациям ускоряющего напряжения, что ведет к разбрызгиванию металла, появлению подрезов [10].

**Осцилляция** луча с различного вида разверткой непосредственно по стыку сварного соединения приводит к увеличению площади зоны действия луча. В результате применения развертки луча, обладающего неизменной удельной поверхностной мощностью, изменяется мгновенное и усредненное по периоду распределение плотности мощности электронного луча [11]. При этом луч дополнительно воздействует на гидродинамические процессы, повышает устойчивость парогазового

канала проплавления и изменяется конфигурация сварочной ванны (рис. 1). Если частота осцилляции луча достаточно мала, то паровой канал практически не изменяется в размере, при более высокой частоте происходит его расширение [12, 13]. За счет изменения формы шва уменьшается его склонность к образованию трещин, корневых дефектов и протяженных полостей [10]. Амплитуда осцилляции луча при сварке лежит в пределах 1–3 мм, частота колебаний – от 50 Гц до 1 кГц и зависит от вида свариваемого материала. Стоит обратить внимание на то, что при любом варианте осцилляции проплавляющая способность луча падает, и для сохранения требуемой глубины проплавления необходимо увеличивать ток пучка.

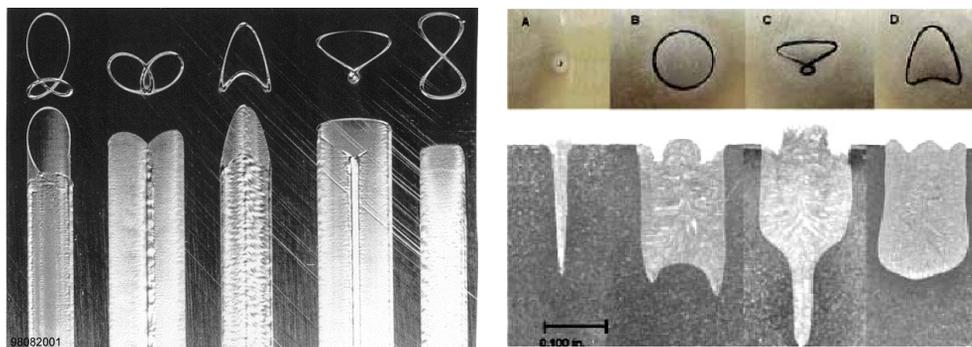


Рис. 1. Влияние развертки электронного луча при осцилляции на форму сварного шва [3]

Наиболее широко используются следующие виды развертки луча: продольная и поперечная, х-образная, а также перемещения луча по эллипсу, дуге и окружности [12–18].

Методика выбора формы развертки электронного луча до настоящего времени не разработана. В то же время накоплено довольно большое количество экспериментальных данных. Есть работы, где делаются попытки оптимизации режимов электронно-лучевой сварки колеблющимся лучом по регрессионным зависимостям, получаемым методом математического планирования эксперимента [14, 15]. Авторы отмечают, что характер формирования шва существенно зависит от типа траектории колебания луча и режимов ЭЛС.

При проведении сварки с поперечными колебаниями электронного луча перемешивание жидкой ванны и измельчение структуры про-

исходит более интенсивно, чем при сварке статическим лучом [16]. Изменяя одновременно частоту, амплитуду колебаний луча, можно получить швы с самой различной формой поперечного сечения от кинжальной ( $b/h < 0,1$ ) до поверхностной ( $b/h > 10$ ).

Достаточно большое количество исследований посвящено электронно-лучевой сварке с вращением пучка по круговой траектории, так как при этом достигается максимальный эффект снижения пикообразования и сопутствующих ему дефектов [12, 13, 17, 18]. Во многих работах выбор параметров круговой осцилляции производится эмпирическим путем, при проплавлении большого количества образцов.

В работе [18] рассматривается модель, позволяющая объяснить влияние круговой развертки луча на формирование шва, приводятся расчеты, выполненные с целью выбора оптимальных частоты и диаметра развертки. Предлагаемая модель учитывает противодействие центробежных сил, возникающих в сварочной ванне при определенном диапазоне развертки луча, капиллярным силам. Дальнейшее развитие модель, учитывающая соизмеримость центробежных и капиллярных сил, нашла в работах [12, 13]. Здесь на основе этой модели проводится анализ устойчивости корневой части канала проплавления и предложено проводить сварку при увеличенных углах развертки, что влияет на повышение гидродинамической устойчивости канала проплавления. Благодаря использованию увеличенных углов развертки авторами были получены швы с закругленным корнем, и амплитуда пульсации глубины не превышала 1 %. На несквозных швах из стали 12Х2Н4МА предотвращено образование горячих трещин.

Электронно-лучевая сварка с вращением электронного пучка по круговой траектории позволяет добиться существенного уменьшения пикообразования, однако, ввиду того что плотность мощности в центральной части зоны нагрева мала, использование круговой развертки приводит к значительному уменьшению глубины проплавления по сравнению с электронно-лучевой сваркой неподвижным лучом.

Недостатком круговой развертки электронного пучка является также различие направлений движения пучка на противоположных кромках сварного шва. При этом на одной из кромок направление движения пучка совпадает с направлением скорости сварки, а на другом – противоположно ему, что может приводить к неравномерности образования шва. При больших скоростях вращения электронный пу-

чок может превращаться в полый пучок, использование которого, исходя из электронно-оптических свойств канала проплавления, является энергетически невыгодным [19]. Устранение асимметрии при круговом перемещении электронного пучка может быть достигнуто за счет ограничения колебаний электронного пучка в плоскости, совпадающей с направлением скорости сварки.

В связи с этим значительный интерес представляет осцилляция электронного луча по  $x$ -образной траектории, которая является, в некотором роде, суперпозицией продольных и поперечных колебаний. Использование этой траектории развертки при электронно-лучевой сварке обеспечивает широкие технические возможности, связанные с гибкостью регулирования характеристик термического воздействия электронного пучка за счет изменения параметров траектории: угла между линиями, скорости движения пучка и амплитуды его отклонения [20]. Использование  $x$ -образной развертки позволяет достичь существенного уменьшения амплитуды пиков проплавления при незначительном уменьшении глубины канала.

Следует отметить, что практически все работы, связанные с введением в сварочную ванну тепловых колебаний при электронно-лучевой сварке посредством осцилляции луча, исследуют влияние параметров режима сварки на устранение специфических дефектов, получение бездефектных швов и почти не рассматривают их влияние на кристаллизацию сварочной ванны и формирование первичной структуры металла шва. Хотя именно осцилляция электронного луча по траекториям различного вида может быть использована как метод управления кристаллизацией металла шва при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением.

В последние годы стала широко применяться **многолучевая и многофокусная сварка** с «расщеплением» электронного луча на несколько тепловых источников. Данные методы основаны на динамическом позиционировании луча, которое осуществляется за счет высокочастотного управления перемещением и отклонением луча относительно стыка и его фокусировкой, таким образом, что луч действует одновременно в нескольких местах [21–25]. При этом происходит формирование нескольких тепловых источников, обеспечивающих одновременный ввод тепла в свариваемые заготовки в нескольких участках, расположенных друг от друга на некотором расстоянии. Такое

расщепление пучка позволяет проводить ЭЛС с различными вариациями: либо сварку сразу в нескольких обрабатываемых зонах, либо сварку с образованием нескольких сварочных ванн, следующих друг за другом, либо совмещение сварки и термообработки [3–5].

Основоположником развития технологии и техники является Германия, создавшая в 2000 г. высокочастотный метод 3D-отклонения луча [26].

При *многолучевой* (многованновой) *сварке* электронный луч сканирует по поверхности изделия с высокой частотой (~ 5 кГц и более) по нескольким точкам, расположенным друг от друга на расстоянии, от одной к другой и обратно (рис. 2). Мощность электронного пучка в каждой точке не меняется, меняется лишь время его воздействия. Во время действия луча в точке формируется свой парогазовый канал и сварочная ванна. Благодаря высокой частоте сканирования в период отсутствия луча канал проплавления сохраняется и не разрушается. Таким образом, создается эффект одновременной многолучевой сварки.

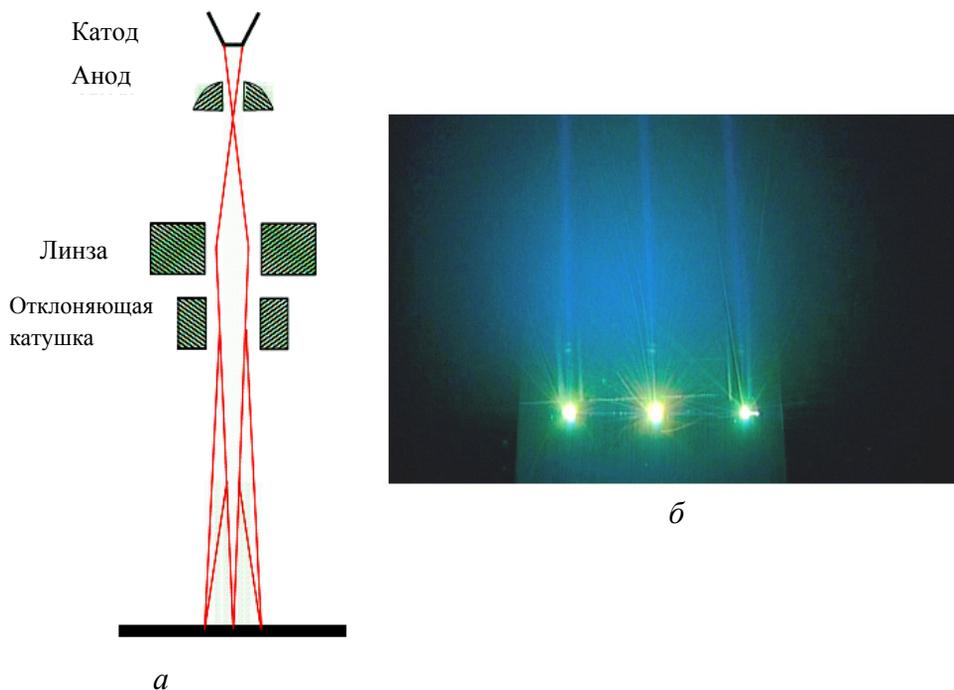


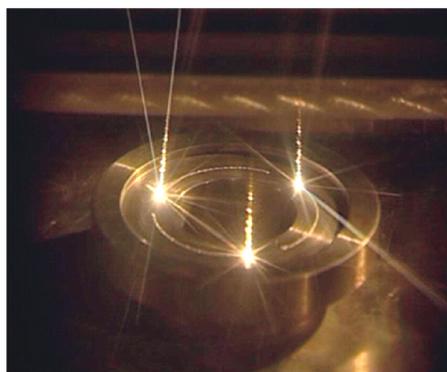
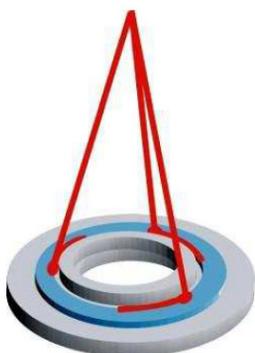
Рис. 2. Трехлучевая сварка: а – схематическое изображение; б – процесс [5]

Примером многованновой сварки сразу в нескольких обрабатываемых зонах является сварка кольцевых швов переходников сложно-профильной конструкции или сварка зубчатых деталей (рис. 3, а). При однопроходной сварке по круговой траектории возникает несимметричность деформаций в процессе сварки от начала ввода луча и до момента замыкания шва. Также в технологическом процессе могут быть предусмотрены прихваточные швы для двух заготовок перед их сваркой. В результате усадки начальной части сварного шва зазор в стыке постепенно увеличивается, за счет влияния автоподогрева к концу рабочего прохода размер сварочной ванны и, соответственно, шва изменяется. Всё это приводит к образованию таких дефектов, как несплавление кромок, неравномерность глубины проплавления, коробление детали [27]. При многолучевой сварке, например одновременно тремя лучами (рис. 3, б), смещенными на  $120^\circ$ , напряжения возникают симметрично, что не приводит к смещению. Количество одновременно перемещаемых сварочных ванн при такой технологии зависит от размера и геометрии детали и ширины отклонения электронного луча. По сравнению с однопроходной сваркой время сварки снижается до одной трети, также сводятся к минимуму деформации из-за более низкого нагрева деталей [21, 22, 25]. Особенностью многованновой сварки в нескольких обрабатываемых зонах является то, что сварной шов перпендикулярен поверхности (см. рис. 3, б). Угол падения электронного луча и, следовательно, шов зависят от диаметра свариваемого круга и расстояния между источником луча и изделием (рис. 3, в) [22, 25].

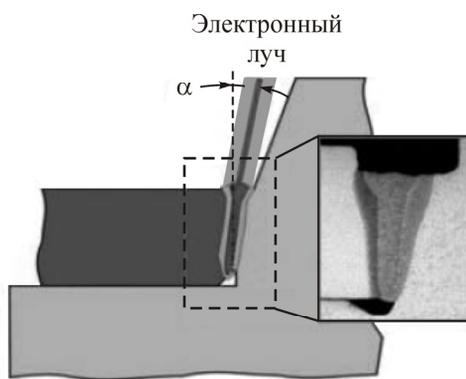
Применение многованной технологии с образованием нескольких сварочных ванн, следующих друг за другом, при сварке чугуна приводит к снижению пористости и твердости сварного шва (рис. 4) [6, 7]. При сварке алюминиевых отливок также наблюдается дегазация металла шва. Сварка с расщеплением электронного луча на три позволила понизить пористость сварного шва до 0,76 %, в то время как пористость сварного шва, выполненного одним лучом, составляет 5,05 % [13].



*a*



*б*



*в*

Рис. 3. Многоканальная электронно-лучевая сварка: *a* – изделие; *б* – схема и процесс сварки; *в* – элемент детали со сварным швом [4]

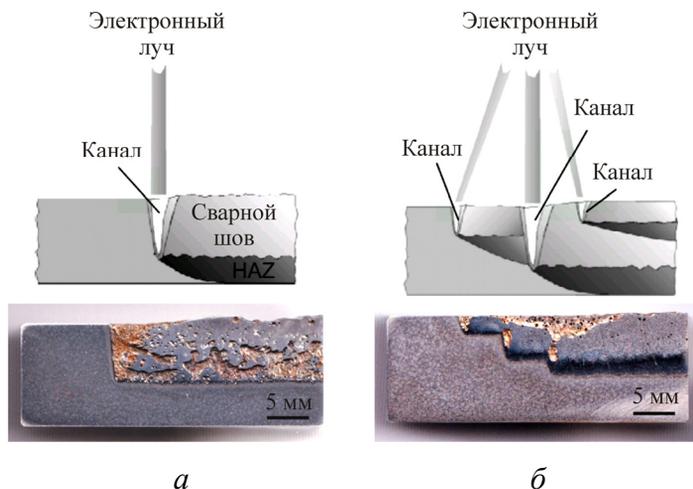


Рис. 4. Сравнение вариантов электронно-лучевой сварки и качества сварного шва: а – одна сварочная ванна; б – три сварочных ванны [28, 29]

Положительное влияние сварки с тремя сварочными ваннами одновременно можно объяснить следующим образом. Близость парогазовых каналов приводит к непосредственному изменению температурно-временных режимов сварки, отличающихся от термического цикла при однолучевой сварке, также дополнительно происходит переплав металла шва последующим пучком. Этот факт расширяет возможности применения технологии расщепления электронного пучка и для других материалов, с которыми возникают сложности при ЭЛС.

При *многофокусной сварке* происходит динамическое синхронное изменение фокуса и отклонение электронного луча в определенную точку. В результате в каждой точке ввода луча формируется сварочная ванна со своей индивидуальной фокусировкой.

Таким образом, стало возможно применять технологию многолучевой сварки для изделий, где несколько сварных швов выполняются на различной высоте. С помощью однолучевой сварки эти швы должны быть сварены по отдельности. Применение многофокусной технологии позволяет выполнять такие швы одновременно, с оптимальным фокусным положением луча (рис. 5) [5].

Такой же принцип используется для выполнения одновременно сварочного и косметического швов. При быстром «прыжке» луча можно одновременно выполнить глубокий шов с острой фокусировкой и его разглаживание с фокусом выше поверхности детали (недофо-

кусированный луч). Мощность луча должна синхронно соответствовать положению его фокуса. Определенное расстояние между ваннами и частота колебаний позволяют улучшить форму сварного шва, повысить дегазацию сварочной ванны, соответственно, уменьшить количество дефектов, улучшая характеристики сварного соединения [27]. Также с помощью многофокусной техники можно получать хорошо сформированный корневой валик.

Технология расщепления луча на концентрированные тепловые источники с изменением фокусировки луча открывает широкий диапазон использования, в частности совмещение таких процессов, как сварка и термообработка [27]. Электронный луч может использоваться для предварительного или сопутствующего нагрева при сварке, выполнения косметического шва, а также для послесварочного нагрева закристаллизовавшегося металла. Например, первый дефокусированный луч высокой мощности, сканируя, создает подогревающее поле. Затем луч с уменьшенной мощностью, сфокусированный на поверхности детали, направляется в сварочную позицию и выполняет сварной шов. Наконец, третий луч, отличающийся положением фокуса и мощностью, сглаживает шов в течение одной операции (рис. 6).

Подобная технология используется при сварке никелевых сплавов, склонных к горячим трещинам. Чтобы подавить образование горячих трещин, необходимо сопутствующее поле подогрева с обеих сторон (позади) шва построить так, чтобы уменьшить скорость охлаждения и выстро-

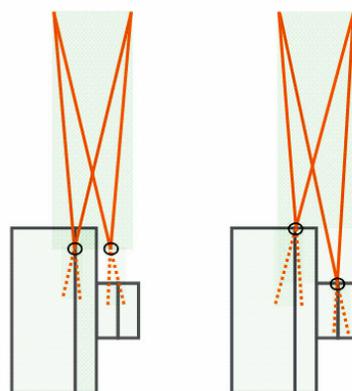


Рис. 5. Электронно-лучевая многофокусная сварка: слева – без изменяемой фокусировки; справа – с изменяемой фокусировкой, сварка происходит одновременно в двух местах [5]

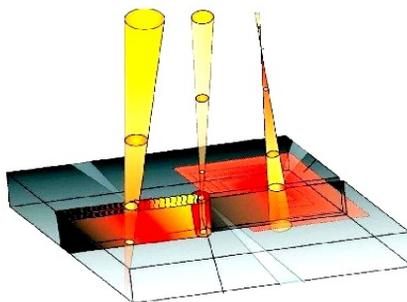


Рис. 6. Схема электронно-лучевой сварки при одновременном воздействии трех лучей различной фокусировки

ить напряжения сжатия в медленно остывающей зоне плавления. Этот способ применим для суперсплавов новейших газовых турбин, которые при малой массе должны быть устойчивы к действию высокой температуры [1]. При работе с чугуном применяют многопроцессорную сварку: одновременно производится предварительный подогрев стыка, трехванновая сварка и послесварочный нагрев (рис. 7). Данная технология позволяет производить сварку без присадочного материала, устранить образование трещин, уменьшить пористость сварных швов, обеспечить однородное формирование металла шва и значительно уменьшить твердость в зоне термического влияния [5, 28].



Рис. 7. Схема тепловых полей при сварке чугуна [6]

Многочувствительная техника может успешно применяться при соединении разнородных материалов, например бронзового венца червячного колеса со ступицей из чугуна или стали, чтобы уменьшить стоимость колеса, а также при сварке других композиций, например меди с вольфрамом или стали с алюминием через медную прокладку. Если оба материала расплавляются одновременно, то в зависимости от соотношения компонентов в расплаве образуется интерметаллическая фаза, которая является исключительно нежелательной из-за ее хрупкости. Благодаря несимметричному подводу энергии двумя или несколькими лучами мощность в композиции должна подбираться по возможности так, чтобы избежать образования интерметаллидов [1].

При ЭЛС стали с алюминием через медную прокладку первый луч расплавляет в правильной пропорции всю промежуточную прокладку и такую часть алюминия, чтобы в смеси получалась алюминиевая бронза. Далее на пригодном расстоянии от стыка второй луч сваривает эту бронзу со сталью [1].

Следует отметить, что применение технологии многолучевой и многофокусной сварки возможно для изделий малой и средней толщины.

### **Список литературы**

1. Башенко В.В., Вихман В.Б. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки. Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки // Материалы I С.-Петербур. Междунар. науч.-техн. конф., 19–22 мая 2008 г. – СПб.: ВиТ-Принт, 2008. – С. 5–21.
2. Вихман В.Б., А.Н. Козлов, Маслов М.А. Преимущества и недостатки электронного луча при сварке по сравнению с лазером и электрической дугой // Доклады III С.-Петербург. Междунар. науч.-техн. конф., 24–26 июня 2014 г. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С. 4–19.
3. Masny H. Multi-beam technology in electron beam welding // Welding and Joining Institute. – 2006. – Vol. 34. – P. 1–4.
4. Zenker R. Modern thermal electron beam processes – research results and industrial application // La Metallurgia Italiana. – 2009. – Iss. 3. – P. 1–8.
5. Elektronenstrahlschweißen Grundlagen einer faszinierenden Technik / A. Volker [et al.]. – Munich, 2011. – 98 s.
6. Зорин Ю.Н. Повышение эффективности электронно-лучевой сварки // Известия вузов. Машиностроение. – 1985. – № 12. – С. 92–95.
7. Зорин Ю.Н., Шарохин А.П. Выборы оптимального диапазона частоты модуляции тока луча при ЭЛС // Электронно-лучевая сварка: материалы всесоюз. конф., Москва, 1–2 апр. 1986. – М., 1986. – С. 28–33.
8. Углов А.А., Зуев И.В., Ильюшенко Н.К. О некоторых эффектах при динамической фокусировке электронного луча // 5-я Всесоюз. конф. по электронно-лучевой сварке. – Киев, 1977. – С. 31–34.
9. Углов А.А., Зуев И.В., Ильюшенко Н.К. О некоторых эффектах при динамической фокусировке электронного луча // Физика и химия обработки материалов. – 1976. – № 2. – С. 131–133.
10. Кайдалов А.А., Назаренко О.К. Основные технологические приемы сварки электронным пучком // Автоматическая сварка. – 1986. – № 4. – С. 51–58.
11. Глазов С.И., Люшинский А.В. Основы технологии электронно-лучевой и диффузионной сварки. – Рыбинск: Рыбинск. дом печати, 2001. – С. 123–233.
12. Акопьянц К.С. Предотвращение образования корневых дефектов при ЭЛС // Автоматическая сварка. – 1984. – № 6. – С. 59–61.

13. Предотвращение образования корневых дефектов при ЭЛС с несковозным проплавлением глубиной до 60 мм / К.С. Акопьянц, А.В. Емченко-Рыбко, В.Ю. Непорохин, Г.А. Шилов // Автоматическая сварка. – 1989. – № 4. – С. 30–34.

14. Барышев М.С., Мусарыгин В.В., Редчиц А.А. Повышение качества сварного соединения титановых сплавов путем оптимизации траектории движения луча и параметров режима ЭЛС // Ресурсосберегающие технологии в сварочном производстве для машиностроительного комплекса: материалы семинара / Моск. дом науч.-техн. просв. – М., 1989. – С. 73–76.

15. Барышев М.С., Редчиц А.А. Оптимизация режимов сварки колеблющимся электронным лучом: тез. докл. 4-й Всесоюз. конф. по сварке цветных металлов. – Киев, 1990. – С. 34.

16. Рыжков Ф.Н., Суворин В.Я. Технологические особенности сварки в вакууме колеблющимся поперек шва электронным пучком // Автоматическая сварка. – 1971. – № 1. – С. 16–21.

17. Нестеренко В.М., Кравчук Л.А. Выбор параметров вращения пучка по окружности и их влияние на геометрию шва // Автоматическая сварка. – 1981. – № 10. – С. 25–28.

18. Шилов Г.А., Акопьянц К.С., Касаткин О.О. Влияние частоты и диаметра круговой развертки электронного луча на проплавление при ЭЛС // Автоматическая сварка. – 1983. – № 8. – С. 25–28.

19. Новиков А.А. Электронно-оптическая модель канала проплавления при электронно-лучевой сварке и обработке // Физика и химия обработки материалов. – 1977. – № 1. – С. 43–48.

20. Беленький В.Я. Развертка электронного луча по х-образной траектории как средство уменьшения дефектов в корне шва при ЭЛС // Автоматическая сварка. – 1986. – № 9. – С. 35–37.

21. Zenker R. Electron beam surface treatment and multipool welding – state of the art // Proceedings of the EBEAM 2002. International Conference on High-Power Electron Beam Technology. 27–29.10.2002. – Hilton Head Island, 2002. – P. 12-1–12-5

22. Zenker R. Elektronenstrahlbearbeitung für Power-trainkomponenten // Kooperationsforum Metalle im Automobilbau, Innovationsforum in Be- und Verarbeitung, 29.11.2005. – Hof, 2005.

23. Survey of electron beam technologies at FEP / G. Mattausch, H. Morgner, J. Daenhardt [et al.] // Proceedings of the EBEAM 2002. Inter-

national Conference on High-Power Electron Beam Technology. – Hilton Head Island, 2002. – P. 11/1–11/11.

24. Loewer T. Analysis, visualisation and accurate description of an electron beam for high repeatability of industrial production processes // Proceedings of the 7th International Conference on Electron Beam Technologies. – Varna, 2003. – P. 45–50.

25. Moderne Elektronenstrahltechnologien zum Fügen und zur Randschichtbehandlung / R. Zenker, A. Buchwalder, N. Frenkler, S. Thiemer // *Vakuum in der Praxis*. – 2005. – Vol. 17, № 2. – P. 66–72.

26. Effects of process parameters on centerline solidification in EB weld / Y. Komiro, C.S. Punshon, T.G. Gooch, P.S. Blakaley // *Metal Constr.* – 1986. – № 2. – P. 104–111.

27. Назаренко О.К., Кайдалов А.А. Электронно-лучевая сварка. – Киев: Наук. думка, 1987. – 256 с.

28. Rührich K., Zenker R., Mangler M. Investigations relating to electron beam multipool welding of metal welds based on cast iron // 64th Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding. – Chennai, 2011.

29. Rührich K., Zenker R., Freiberg D. Characteristics and prospects of process integrated thermal field heat treatment for electron beam welding of cast iron // 2nd Electron Beam Welding Conference. – 2012.

### References

1. Bashenko V.V., Vikhman V.B. Sostoianie i perspektivy razvitiia elektronno-luchevoi svarki. Tekhnologii i oborudovanie elektronno-luchevoi svarki [State and prospects of development of electron beam welding. Technologies and equipment of electron beam welding]. *Materialy I Sankt-Peterburgskoi Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*. 19-22 May 2008. Saint Petersburg: ViT-Print, 2008, pp. 5-21.

2. Vikhman V.B., A.N. Kozlov, Maslov M.A. Preimushchestva i nedostatki elektronnoogo luchu pri svarke po sravneniiu s lazerom i elektricheskoi dugoi [Benefits and shortcomings of an electronic beam when welding in comparison with the laser and an electric arch]. *Doklady III Sankt-Peterburgskoi Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii*. 24-26 June 2014. Saint Petersburg: Politehnicheskii universitet, 2014, pp. 4-19.

3. Masny H. Multi-beam technology in electron beam welding. *Welding and Joining Institute*, 2006, vol. 34, pp. 1-4.

4. Zenker R. Modern thermal electron beam processes – research results and industrial application. *La Metallurgia Italiana*, 2009, iss. 3, pp. 1-8.

5. Volker A. [et al.]. Elektronenstrahlschweißen Grundlagen einer faszinierenden Technik. Munich, 2011. 98 p.

6. Zorin Iu.N. Povyshenie effektivnosti elektronno-luchevoi svarki [Increase in efficiency of electron beam welding]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 1985, no. 12, pp. 92-95.

7. Zorin Iu.N., Sharokhin A.P. Vybory optimal'nogo diapazona chastyoty moduliatsii toka lucha pri ELS [Choices of the optimum range of modulation frequency of current of a ray in case of EBW]. *Materialy vse-soiuznoi konferencii "Elektronno-luchevaia svarka"*. 1-2 April 1986. Moscow, 1986, pp. 28-33.

8. Uglov A.A., Zuev I.V., Il'iushenko N.K. O nekotorykh effektakh pri dinamicheskoi fokusirovke elektronnogo lucha About some effects at dynamic focusing of an electronic beam]. *5-ia Vsesoiuznaia konferentsiia po elektronno-luchevoi svarke*. Kiev, 1977, pp. 31-34.

9. Uglov A.A., Zuev I.V., Il'iushenko N.K. O nekotorykh effektakh pri dinamicheskoi fokusirovke elektronnogo lucha [About some effects at dynamic focusing of an electronic beam]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1976, no. 2, pp. 131-133.

10. Kaidalov A.A., Nazarenko O.K. Osnovnye tekhnologicheskie priemy svarki elektronnym puchkom [Main processing methods of welding by an electron beam]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1986, no. 4, pp. 51-58.

11. Glazov S.I., Liushinskii A.V. Osnovy tekhnologii elektronno-luchevoi i diffuzionnoi svarki [Bases of technology of electron beam and diffusive welding]. Rybinskii dom pečhati, 2001, pp. 123-233.

12. Akop'iants K.S. Predotvrashchenie obrazovaniia kornevykh defektov pri ELS [Prevention of formation of root defects at EBW]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1984, no. 6, pp. 59-61.

13. Akop'iants K.S., Emchenko-Rybko A.V., Neporokhin V.Iu., Shilov G.A. Predotvrashchenie obrazovaniia kornevykh defektov pri ELS s neskvoznym proplavleniem glubinoi do 60 mm [Prevention of formation of root defects at EBW with not through pro-melting up to 60 mm in depth]. *Avtomaticheskaia svarka*, 1989, no. 4, pp. 30-34.

14. Baryshev M.S., Musarygin V.V., Redchits A.A. Povyshenie kachestva svarnogo soedineniia titanovykh splavov putem optimizatsii traektorii dvizheniia lucha i parametrov rezhima ELS [Improvement of quality of

welded compound of titanic alloys by optimization of a trajectory of the movement of a beam and parameters of the EBW mode]. *Materialy seminara "Resursosbere-gaiushchie tekhnologii v svarochnom proizvodstve dlia mashinostroitel'nogo kompleksa"*. Moskovskii dom nauchno tekhnicheskogo prosviashcheniia, 1989, pp. 73-76.

15. Baryshev M.S., Redchits A.A. Optimizatsiia rezhimov svarki kolebliushchimsia elektronnyim luchom [Optimization of the modes of welding by the fluctuating electronic beam]. *Tezisy dokladov 4-i Vsesoiuznoi konferentsii po svarke tsvetnykh metallov*. Kiev, 1990, p. 34.

16. Ryzhkov F.N., Suvorin V.Ia. Tekhnologicheskie osobennosti svarki v vakuumе kolebliushchimsia poperek shva elektronnyim puchkom [Technological features of welding in vacuum the electron beam fluctuating across a seam]. *Avtomaticheskaiа svarka*, 1971, no. 1, pp. 16-21.

17. Nesterenko V.M., Kravchuk L.A. Vybor parametrov vrashcheniia puchka po okruzhnosti i ikh vliianie na geometriiu shva [The choice of parameters of rotation of a bunch on circles and their influence on seam geometry]. *Avtomaticheskaiа svarka*, 1981, no. 10, pp. 25-28.

18. Shilov G.A., Akop'iants K.S., Kasatkin O.O. Vliianie chastoty i diametra krugovoi razvertki elektronного луча na proplavlenie pri ELS [Influence of frequency and diameter of circle scanning of an electron ray on pro-melt in case of EBW]. *Avtomaticheskaiа svarka*, 1983, no. 8, pp. 25-28.

19. Novikov A.A. Elektronno-opticheskaiа model' kanala proplavleniia pri elektronno-luchevoi svarke i obrabotke [Electron-optical model of the channel of pro-melting at electron beam welding and processing]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1977, no. 1, pp. 43-48.

20. Belen'kii V.Ia. Razvertka elektronного луча po x-obraznoi traektorii kak sredstvo umen'sheniia defektov v korne shva pri ELS [Development of an electronic beam on a x-shaped trajectory as means of reduction of defects in a seam root at EBW]. *Avtomaticheskaiа svarka*, 1986, no. 9, pp. 35-37.

21. Zenker R. Electron beam surface treatment and multipool welding – state of the art. *Proceedings of the EBEAM 2002. International Conference on High-Power Electron Beam Technology*. 27-29.10.2002. Hilton Head Island, 2002, pp. 12-1-12-5

22. Zenker R. Elektronenstrahlbearbeitung für Power-trainkomponenten. *Kooperationsforum Metalle im Automobilbau, Innovationsforum in Be- und Verarbeitung*, 29.11.2005. Hof, 2005.

23. Mattausch G., Morgner H., Daenhardt J. [et al.]. Survey of electron beam technologies at FEP. *Proceedings of the EBEAM 2002. International Conference on High-Power Electron Beam Technology*. Hilton Head Island, 2002, pp. 11/1-11/11.

24. Loewer T. Analysis, visualisation and accurate description of an electron beam for high repeatability of industrial production processes. *Proceedings of the 7th International Conference on Electron Beam Technologies*. Varna, 2003, pp. 45-50.

25. Zenker R., Buchwalder A., Frenkler N., Thiemer S. Moderne Elektronenstrahltechnologien zum Fügen und zur Rand-schichtbehandlung. *Vakuum in der Praxis*, 2005, vol. 17, no. 2, pp. 66-72.

26. Komiro Y., Punshon C.S., Gooch T.G., Blakaley P.S. Effects of process parameters on centerline solidification in EB weld. *Metal Constr.*, 1986, no. 2, pp. 104-111.

27. Nazarenko O.K., Kaidalov A.A. Elektronno-luchevoia svarka [Electron beam welding]. Kiev: Naukova dumka, 1987. 256 p.

28. Rührich K., Zenker R., Mangler M. Investigations relating to electron beam multipool welding of metal welds based on cast iron. *64th Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding*. Chennai, 2011.

29. Rührich K., Zenker R., Freiberg D. Characteristics and prospects of process integrated thermal field heat treatment for electron beam welding of cast iron. *2nd Electron Beam Welding Conference*, 2012.

Получено 02.11.2016

### Об авторах

**Ольшанская Татьяна Васильевна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: tvob66@ Rambler.ru.

**Саломатова Екатерина Сергеевна** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры сварочного производства и технологии конструкционных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: weld-katy@mail.ru.

### **About the authors**

**Tatiana V. Olshanskaya** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: tvo66@rambler.ru.

**Ekaterina S. Salomatova** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: weld-katy@mail.ru.