

На правах рукописи

УДК 621.791.72

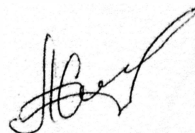
СЛИВА Андрей Петрович

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ
БОЛЬШИХ ТОЛЩИН В МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

Специальность 05.02.10 – Сварка, родственные процессы и технологии

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Москва - 2013

Работа выполнена на кафедре технологии металлов ФГБОУ ВПО
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Научный руководитель – доктор технических наук
ДРАГУНОВ Виктор Карпович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
директор филиала «НИИД»
ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»
ГЕЙКИН Валерий Александрович

ЛАСТОВИРЯ Вячеслав Николаевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой МГИУ

Ведущая организация: **ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» (г.Москва).**

Защита диссертации состоится «25» апреля 2013 года в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.01 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

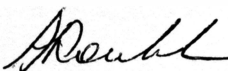
Телефон для справок: (499) 267-09-63.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим высылать на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «19» марта 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Коновалов А.В.



940
хл

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Применение электронно-лучевой технологии для сварки (ЭЛС) толстостенных соединений наиболее ответственных узлов современного энергетического оборудования, таких как роторы, корпуса и диафрагмы турбин, сосуды высокого давления, корпуса атомных реакторов и др., позволяет повысить скорость сварки в 10-15 раз, снизить расход конструкционных материалов на 10-15% и сварочных материалов на 60-100%, уменьшить потребление электроэнергии на 30-80%, осуществить монтаж уникальных крупногабаритных конструкций и существенно улучшить условия труда сварщиков.

Несмотря на то, что механизм воздействия электронного пучка на материалы исследуется давно, физические и металлургические процессы, происходящие при ЭЛС, изучены еще недостаточно. Появление дефектов при ЭЛС металлов больших толщин связано со спецификой формирования швов в различных пространственных положениях. При этом, свободное формирование при ЭЛС горизонтальным пучком имеет ряд преимуществ: технология выполнения швов значительно проще и не требует специальных приспособлений, снижается расход материалов, легче осуществляется визуальный контроль процесса. Однако, качественное формирование шва в данном случае осуществимо лишь на определенных режимах сварки, при отклонении от которых появляются дефекты, причем с увеличением толщины изделия вероятность их возникновения значительно возрастает. На сегодняшний день нет научных обоснований выбора режимов сварки металлов большой толщины, обеспечивающих стабильное формирование сварных соединений, а существующие способы ЭЛС стальных конструкций с глубоким проплавлением имеют ряд недостатков и не могут обеспечить в полной мере выполнения широкого спектра выдвигаемых задач. В ряде случаев их применение ведет к значительному усложнению технологии или удорожанию оборудования. Поэтому данная работа, направленная на разработку способов ЭЛС, которые обеспечивают повышение качества формирования сварных швов, является актуальной и имеет научное и практическое значение.

Целью диссертационной работы является повышение стабильности формирования сварных соединений сталей аустенитного класса больших толщин на основе изменения пространственных параметров пучка и рационального выбора режима сварки.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

- изучен механизм проплавления металлов электронным пучком и проведен анализ сил, действующих в канале проплавления на сварочную ванну;
- исследовано влияние поперечного магнитного поля на параметры электронного пучка, форму и устойчивость канала проплавления при сварке и разработаны способы обеспечения заданных пространственных параметров электронного пучка;
- выполнены теоретические и экспериментальные исследования влияния параметров режима сварки на качество и стабильность формирования сварных соединений при ЭЛС горизонтальным пучком в магнитном поле и без него;

- разработан способ и технология ЭЛС горизонтальным пучком металлов больших толщин с использованием магнитного поля для получения канала проплавления требуемой формы;
- разработан способ сварки электронным пучком в нижнем положении в магнитном поле;
- предложен способ автоматического регулирования кривизны канала проплавления при ЭЛС горизонтальным пучком в магнитном поле по величине проходящего тока;
- исследованы структура и свойства сварных соединений, полученных с использованием ЭЛС в магнитном поле.

Методы исследования. Поставленные задачи решали с применением теоретических и экспериментальных методов исследования. Математические модели разработаны с использованием теории электромагнетизма, основных законов гидродинамики и теории дифференциальных уравнений. Расчеты проводились с применением программного обеспечения MathCAD. Для обработки экспериментальных данных использовались методы математической статистики. Эксперименты по электронно-лучевой сварке проводились с применением энергетического комплекса ЭЛА 60/60. Макро- и микроструктура исследовалась с использованием оптических микроскопов Zeiss Axio Observer Z1m, AxioScope A1. Для исследования механических свойств применялись твердомер Wilson Hardness Group Tukon 2500, прибор МЭИ-Т7, автоматизированный прибор МЭИ-ТА, испытательная машина Instron 5982.

Научная новизна диссертационной работы

1. Установлено, что при ЭЛС на подъем в поперечном магнитном поле сварочная ванна находится в равновесии, когда давление в парогазовом канале равно давлению от сил поверхностного натяжения, при этом гидростатическое давление не оказывает влияния на стабильность формирования сварных соединений.

2. Выявлены закономерности изменения минимальной критической скорости сварки от кривизны канала проплавления, параметров режима сварки и свойств материалов, которые определяют стабильность формирования сварных соединений при ЭЛС горизонтальным пучком на подъем.

3. Определены закономерности изменения характера течения жидкого металла в сварочной ванне от параметров режима сварки, свойств материала и размеров шва, которые позволяют определять максимальную критическую скорость сварки, обеспечивающую стабильное формирование сварных соединений.

4. Установлено, что с увеличением угла наклона пушки и кривизны канала проплавления расширяется диапазон изменения погонной энергии, в котором наблюдается стабильное бездефектное формирование швов, ширина которых уменьшается пропорционально снижению погонной энергии.

Практическая значимость диссертационной работы

1. Разработана методика определения диапазона скоростей сварки, в котором формирование сварных соединений при ЭЛС горизонтальным пучком на подъем происходит наиболее стабильно.

2. Разработан способ ЭЛС горизонтальным пучком на подъем со свободным формированием в магнитном поле, позволяющий повысить качество сварных соединений за счет изменения баланса сил действующих на сварочную ванну.

3. Разработан способ ЭЛС в магнитном поле в нижнем положении, позволяющий уменьшить амплитуду колебания глубины проплавления за счет перераспределения выделяемой энергии по глубине пароголового канала. Использование предложенного способа обеспечивает повышение качества сварных соединений при ЭЛС без сквозного проплавления.

4. Предложен способ автоматического регулирования формы канала проплавления при ЭЛС горизонтальным пучком на подъем, позволяющий повысить стабильность формирования сварных соединений за счет изменения пространственных параметров пучка в поперечном магнитном поле в зависимости от величины проходящего тока.

5. Разработана технология ЭЛС горизонтальным пучком на подъем в магнитном поле сварных соединений крышек теплоносителя несущей конструкции передней стенки модуля blankets ITER.

Апробация работы. Основные положения работы доложены на Международной научно-технической конференции «Славяновские чтения» (Липецк, 2004), Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, 2004, 2005, 2006), The Tenth International conference of electron beam technologies – EBT'2012 (Варна, Болгария, 2012), представлены на выставках: Seoul International invention Fair 2011 (работа удостоена бронзовой медали), Weldex 2009 (работа удостоена победы в номинации «Лучший ученый-сварщик»), обсуждены и одобрены на научных семинарах кафедр технологии сварки и диагностики МГТУ им. Н.Э.Баумана и технологии металлов «НИУ «МЭИ».

Публикации по теме диссертации. По материалам диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 7 в изданиях, рекомендованных ВАК, и получено 3 патента на изобретение.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 101 наименования. Диссертация изложена на 181 странице, содержит 92 рисунка и 21 таблицу.

Работа выполнялась в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы по направлению «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области лазерных, плазменных и пучковых технологий для атомной техники» по теме «Исследование процесса взаимодействия мощных электронных пучков с металлическими материалами, разработка оборудования и технологических основ электроннолучевой сварки деталей большой толщины».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Особенности ЭЛС металлов большой толщины

В главе проведен анализ литературных данных и рассмотрены особенности электронно-лучевой сварки в различных пространственных положениях. Научным исследованиям в области ЭЛС посвящены работы таких ученых, как Ольшанский Н.А., Патон Б.Е., Лесков Г.И., Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А., Башенко В.В., Назаренко О.К., Казаков В.А., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н., Ланкин Ю.Н., Башкатов А.В., Шубин Ф.В., З. Панцер, Х. Кихара, К-О. Мауэр, Драгунов В.К., Мартынов В.Н. и др. Результаты этих исследований показали, что качественное свободное формирование вертикальных швов на вертикальной стенке при ЭЛС со сквозным проплавлением осуществимо лишь на определенных режимах сварки, при отклонении от которых появляются дефекты, причем с увеличением толщины изделия вероятность их возникновения значительно возрастает. Основными дефектами являются полости или пустоты в металле шва, одной из причин образования которых, является вытекание металла из сварочной ванны.

Анализ сил, действующих на жидкий металл при сварке горизонтальным пучком на подъем, показывает, что металлостатическое давление и давление реакции отдачи паров стремятся вытолкнуть расплав из канала, а давление, обусловленное силами поверхностного натяжения, удерживает сварочную ванну. Поэтому при достижении определенного суммарного давления в парогазовом канале металл вытекает из канала проплавления, в результате образуются дефекты типа вакуумных полостей. Известно, что для удержания жидкой ванны на границе канала должно выполняться условие

$$p = \sigma(1/R_1 + 1/R_2) - \rho_{ж}gh - p_v \geq 0, \quad (1)$$

где p – давление на жидкий металл сварочной ванны, Па; $\rho_{ж}$ – плотность жидкого металла, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с; h – глубина сварочной ванны, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, R_1, R_2 – радиусы кривизны жидкой пленки, м; p_v – давление реакции отдачи паров, Па. Из соотношения (1) следует, что для предотвращения образования дефектов необходимо увеличивать давление от сил поверхностного натяжения $p_\sigma = \sigma(1/R_1 + 1/R_2)$, либо уменьшать давление реакции отдачи паров p_v и металлостатическое давление $p_g = \rho_{ж}gh$. Кроме того, свободное формирование шва возможно в ограниченном диапазоне скоростей сварки. Ограничение «снизу» определяется малым значением давления от поверхностного натяжения при большой ширине сварочной ванны, а ограничение «сверху» происходит за счет большого значения металлостатического давления при увеличении глубины сварочной ванны. Диапазон скоростей сварки расширяется при увеличении коэффициента поверхностного натяжения жидкого металла и снижении его плотности. Решающее влияние на пределы ограничения оказывает диаметр пучка, причем при уменьшении диаметра диапазон допустимых скоростей расширяется, так как одновременно увеличивается поверхностное натяжение и снижается металлостатическое давление. Поэтому при сварке любого металла существует крити-

ческое значение диаметра пучка, при превышении которого качественное формирование становится невозможным.

Расширение диапазона режимов сварки и обеспечение требуемых показателей качества сварных соединений могут быть обеспечены за счет применения новых эффективных способов ЭЛС, разработанных с учетом гидродинамических процессов в парогазовом канале и сварочной ванне. В главе обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи исследования.

Глава 2. Изменение пространственных параметров пучка в поперечном магнитном поле

Для повышения стабильности формирования сварочной ванны при сварке горизонтальным пучком на подъем, с учетом сил, действующих на жидкий металл, и условий, при которых происходит вытекание металла из канала предложен способ сварки электронным пучком в поперечном магнитном поле. Сущность способа заключается в изменении формы сварочной ванны и увеличении давления от сил поверхностного натяжения, способствующего удержанию жидкого металла в сварочной ванне. Согласно (1) для этого необходимо уменьшить главные радиусы кривизны поверхности канала R_1 , R_2 . Для изменения радиуса кривизны канала R_2 траектория движения электронов пучка при сварке должна иметь криволинейную форму по толщине изделия и создавать канал проплавления в виде сегмента тора (рис. 1). Тогда увеличится давление от сил поверхностного натяжения, а сила тяжести будет способствовать перемещению жидкого металла в центральную часть сварочной ванны. При такой схеме влияние металлостатического давления на элементы расплава, находящиеся соответственно у задней и передней поверхности будет сведено к минимуму и условие (1) преобразуется к виду:

$$p = \sigma(1/R_1 + 1/R_2) - p_v \geq 0. \quad (2)$$

Данный технологический прием позволяет улучшить условия формирования сварного шва за счет изменения баланса сил, действующих на сварочную ванну.

Изменять траекторию электронов пучка в канале проплавления можно за счет создания по всей толщине стыка свариваемых деталей локального поперечного магнитного поля (рис. 1) с помощью ферромагнитных сердечников соленоида с током или электрических токов, проходящих вдоль задней поверхности свариваемых изделий параллельно стыку. Применимость того или иного способа зависит от магнитных свойств свариваемых материалов. Для сталей аустенитного класса, которые обладают парамагнитными свойствами, магнитное

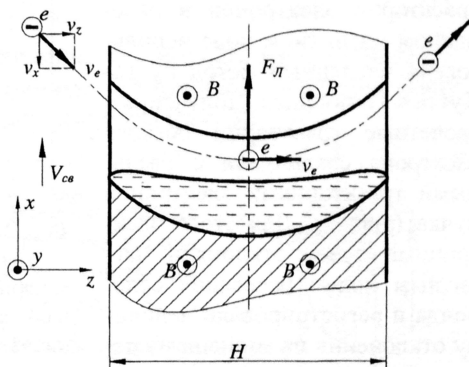


Рис. 1. Схема отклонения осевого электрона пучка в канале проплавления в поперечном магнитном поле

поле создавали полем рассеяния в зазоре ферромагнитного сердечника соленоида. Распределение магнитной индукции по толщине стыка для различных значений тока в обмотке соленоида определяли экспериментально и аппроксимировали экспоненциальной зависимостью:

$$B(x, z) = A_1 e^{-A_2 \sqrt{x^2 + z^2}}, \quad (3)$$

где A_1, A_2 – коэффициенты аппроксимации, зависящие от тока в соленоиде. Для определения траектории электронного пучка в поперечном магнитном поле с изменяющейся плотностью потока по толщине свариваемого изделия разработали математическую модель. При этом рассматривали только изменение траектории осевого электрона пучка с учетом того, что на движущийся электрон действует только сила Лоренца, а индукция магнитного поля всегда остается перпендикулярной направлению его движения. В результате получили систему дифференциальных уравнений второго порядка, аналитические решения которой удастся найти только для нескольких частных случаев:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = e v_z A_1 e^{-A_2 \sqrt{x^2 + z^2}} \\ m \frac{d^2 z}{dt^2} = -e v_x A_1 e^{-A_2 \sqrt{x^2 + z^2}} \end{cases}, \quad (4)$$

где m – масса электрона, кг; e – заряд электрона, Кл. Для расчета траектории электронов в наведенном магнитном поле использовали численный метод Рунге-Кутты 4-го порядка. Полученные расчетные траектории осевого электрона сравнивали с реальными траекториями электронов пучка (рис. 2). Для этого электронный пучок отклоняли магнитным полем рассеяния соленоида и регистрировали величину отклонения на мишени из парамагнитной стали. Экспериментальную часть работы по формированию электронных пучков с заданными пространственными параметрами выполняли на плоских образцах из стали ANSI 316 L(N) при начальном угле наклона пучка $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ и различных значения тока в катушке соленоида. Было установлено, что теоретические и экспериментальные результаты исследования имеют удовлетворительную сходимость.

Таким образом, для реализации предложенного способа сварки деталей большой толщины теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения криволинейных пучков с заданными пространственными характеристиками.

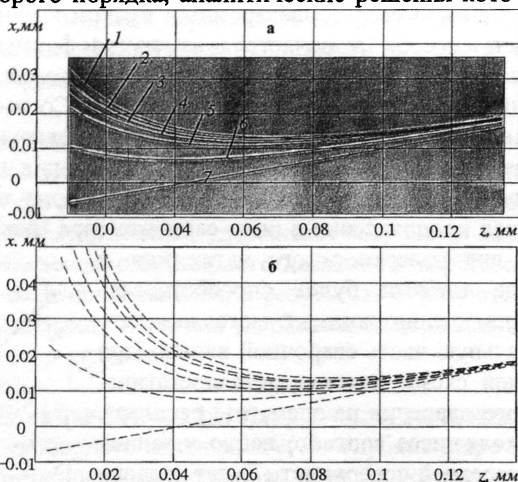


Рис. 2. Экспериментальные (а) и расчетные (б) траектории электронного пучка при угле наклона пучка 10° и различных значениях тока в соленоиде 1 – 1.6 А, 2 – 1.4 А, 3 – 1.2 А, 4 – 1.0 А, 5 – 0.8 А, 6 – 0.4 А, 7 – без поля

Глава 3. Формирование сварных соединений в магнитном поле

Правильный выбор режимов сварки в значительной степени определяет качество сварных соединений, полученных с помощью электронного луча. Одними из наиболее важных параметров являются скорость сварки и диаметр пучка. Они определяют размеры зоны проплавления и, как следствие, интенсивность протекания гидродинамических процессов в сварочной ванне. В данном случае поток жидкой фазы ограничен стенками канала проплавления, причем непрерывно происходит плавление металла, и его кристаллизация в хвостовой части ванны, поэтому аналитически решить задачу обтекания парогозового канала, как конечного тела, достаточно сложно. Тем не менее, о характере течения жидкого металла в данном случае можно судить по обтеканию кругового цилиндра однородным потоком, перпендикулярным к его оси. При малых числах Рейнольдса ($Re < 20$) поток позади цилиндра характеризуется как ламинарный. При увеличении числа Рейнольдса ($20 < Re < 40$) происходит отрыв и образуется пара циркуляционных вихрей, такой режим течения характеризуется как переходный. По мере увеличения скорости вихри начинают вытягиваться в направлении потока, их длина линейно растет с ростом числа Рейнольдса, пока течение не становится неустойчивым при значениях Re , превышающих 40. Таким образом, в качестве критерия для оценки характера переноса жидкого металла с передней стенки канала в сварочную ванну можно использовать безразмерный параметр – число Рейнольдса:

$$Re = \rho_{ж} \frac{V_{пер} d_h}{\mu}, \quad (5)$$

где d_h – гидравлический диаметр, μ – динамическая вязкость жидкого металла, Н·с/м². Скорость переноса жидкой фазы с передней стенки в сварочную ванну приближенно можно определить следующим образом (рис. 3):

$$V_{пер} = V_{на} \frac{\rho_l \rho_{ж}}{H(B_{ш} - d_s)}, \quad (6)$$

где $V_{на} = F_{np} V_{св}$, м³/с; F_{np} – площадь поперечного сечения шва, м²; $V_{св}$ – скорость сварки, м/с; H – глубина канала проплавления, м; d_s – диаметр пучка, м; ρ – плотность металла в нормальных условиях, кг/м³. С учетом $F_{np} \approx B_{ш} H$ и $d_h = \frac{2H(B_{ш} - d_s)}{H + (B_{ш} - d_s)}$ после математических преобразований получим:

$$Re = \frac{\rho}{\mu} V_{св} \frac{2HB_{ш}}{H + (B_{ш} - d_s)}. \quad (7)$$

С учетом известного соотношения:

$$V_{св} = \frac{4}{\pi} \frac{d_s}{S_{пл}} \frac{I_a U_{уск} \eta_{эф} \eta_T}{B_{ш}^2 H}, \quad (8)$$

где η_T и $\eta_{эф}$ – термический и эффективный КПД процесса сварки, $S_{пл}$ – удельная теплота плавления материала Дж/м³, I_a – ток пучка, А, $U_{уск}$ – ускоряющее напряжение, В; после преобразований получим значение

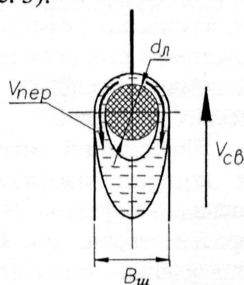


Рис. 3. Поперечное сечение канала проплавления при ЭЛС горизонтальным пучком на подъем

числа Рейнольдса характеризующего поток жидкого металла в канале проплавления в зависимости от параметров режима сварки:

$$Re = \frac{8}{\pi} \frac{\rho d_s I_s U_{сск} \eta_{эф} \eta_T}{\mu S_{на} B_{ш} (H + (B_{ш} - d_s))}. \quad (9)$$

Для приближенной оценки влияния размеров канала на характер потока и как следствие качества формирования сварных соединений по выражению (7) и (9) построены зависимости числа Рейнольдса от ширины шва и скорости сварки коррозионностойкой стали аустенитного класса (рисунок 4) на режиме: $I_s = 0,2$ А; $U_{сск} = 60 \times 10^3$ В; $\eta_{эф} = 0,95$; $\eta_T = 0,484$; $d_s = 0,001$ м; $S_{на} = 8536 \times 10^6$ Дж/м³; $\rho = 7900$ кг/м³; $\mu = 0,5$ кг/(м·с) при толщине образца $H = 0,04$ м. Из них видно, что увеличение числа Рейнольдса выше критического значения $Re_{кр} = 40$, при котором характер переноса меняется от переходного к турбулентному, происходит при увеличении скорости сварки выше 29 м/ч, или при уменьшении ширины шва ниже $1,6d_s$.

При уменьшении скорости сварки уменьшается требуемая величина тока пучка, однако при этом увеличивается ширина шва и объем жидкой фазы в канале проплавления. При сварке горизонтальным пучком большой объем сварочной ванны приводит к вытеканию жидкой фазы из канала проплавления, вследствие чего возникают дефекты в виде полостей. Таким образом, выбор минимально допустимой скорости сварки при ЭЛС горизонтальным пучком является важной задачей в условиях ограниченной мощности электронно-лучевых технологических установок.

Наибольший интерес представляет поиск значений параметров режима при которых наблюдается переход от качественного формирования к появлению дефектов. Выражение для определения максимальной критической скорости сварки, при которой характер переноса жидкого металла в канале проплавления становится турбулентным, можно получить из (7) при подстановке заданного значения числа Рейнольдса:

$$V_{св}^{max} = Re \frac{\mu}{\rho} \frac{H + (B_{ш} - d_s)}{2 \cdot H \cdot B_{ш}}. \quad (10)$$

Однако, на характер переноса в значительной степени влияет ширина сварочной ванны. Это следует учитывать при определении ширины шва в выражении (10). Её значение можно получить из совместного решения (10) и (8):

$$B_{ш} = \frac{1}{2} \sqrt{(H - d_s)^2 + \frac{32}{\pi} \frac{\rho d_s I_s U_{сск} \eta_{эф} \eta_T}{\mu S_{на} Re}} - \frac{H - d_s}{2}. \quad (11)$$

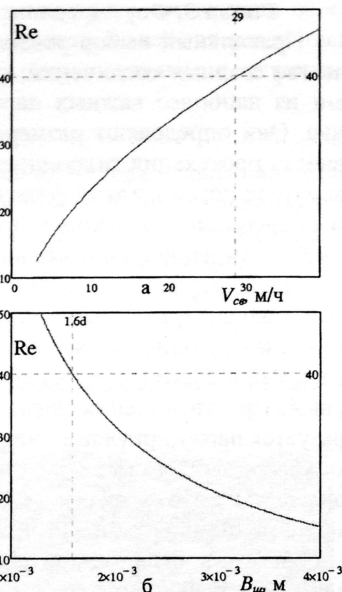


Рис. 4. Зависимость числа Рейнольдса от скорости сварки (а) и ширины шва (б)

Минимальную скорость сварки, можно оценить исходя из равновесия сил действующих на жидкий металл сварочной ванны на границе канала проплавления (1) при следующих допущениях: $R_1 = B_w/2$, $h = B_w$. Тогда, для сварки прямолинейным горизонтальным пучком, с учетом что $R_2 = \infty$, получим $p = 2\sigma/B_w - \rho g B_w - p_v = 0$. С учетом (8) получим минимальную скорость сварки

$$V_{св}^{min} = \frac{4}{\pi} \frac{d_a}{S_{на}} \frac{q_{эф} \eta_T}{H} \left(\frac{2\rho g}{\sqrt{p_v^2 + 8\rho g \sigma - p_v}} \right)^2. \quad (13)$$

Из (2) аналогично получим выражение для оценки минимальной критической скорости сварки криволинейным пучком:

$$V_{св\ кр}^{min} = \left(\frac{p_v}{\sigma} - \frac{1}{R_2} \right)^2 \frac{1}{\pi} \frac{d_a}{S_{на}} \frac{q_{эф} \eta_T}{H}. \quad (14)$$

Поиск совместного решения уравнений (10), (13) и (14) с учетом (11) удобно проводить в графическом виде в зависимости от диаметра пучка. Для получения ламинарного характера течения жидкой фазы в канале примем $Re = 20$, коэффициент поверхностного натяжения для стали при температуре $1700^\circ C$ $\sigma = 1.76$ Н/м, радиус кривизны канала $R_2 = \infty$ в случае сварки прямолинейным пучком, и $R_2 = 0.1$ м при сварке криволинейным пучком. Согласно литературным данным давление в канале при глубоком проплавлении составляет около $p_v = 10^3$ Па. В таком случае, для сварки прямолинейным пучком критический диаметр пучка, при котором можно получить качественное формирование шва, исходя из описанных выше критериев, составляет около 0,93 мм и соответствует скорости сварки 8,3 м/ч. В случае использования криволинейного пучка критический диаметр увеличивается до 1,17 мм при скорости сварки 6,8 м/ч (рис. 5). Следовательно, при использовании криволинейного пучка расширяется диапазон режимов сварки, а именно скорости и диаметра электронного луча при которых возможно получение

качественного формирования сварных швов при ЭЛС на подъем. Экспериментальные исследования влияния формы траектории электронного пучка и параметров режима сварки на формирование сварных соединений проводили на образцах из стали ANSI 316L(N) 40 мм методом проплавления на установке с энергетическим комплексом ЭЛА 60/60. Для создания криволинейной траектории электронов пучка использовали магнитное поле рассеяния от ферромагнитного сер-

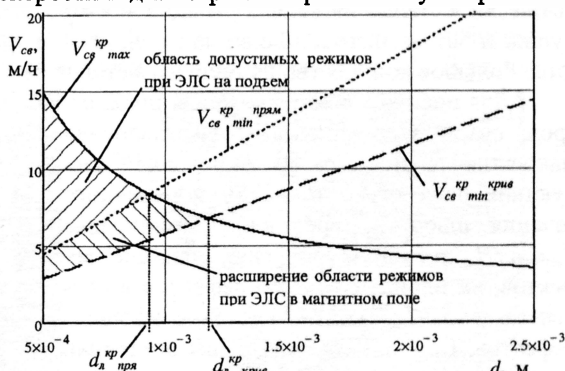


Рис. 5. Изменение максимальной критической скорости сварки $V_{св}^{кр max}$ и минимальных критических скоростей для сварки криволинейным ($V_{св}^{кр min крив}$) и прямолинейным ($V_{св}^{кр min прям}$) пучками стали ANSI 316L(N) в зависимости от диаметра электронного пучка (d_a)

дечника соленоида с током от 0.8 до 1.6 А. Электронно-лучевую пушку устанавливали под углом к горизонту $\alpha = 10, 20, 30^\circ$ и располагали на расстоянии 400 мм от свариваемых образцов (рисунок 6).

Сварку проводили со скоростью 10, 16, 20, 25 м/ч, при этом для каждой скорости, угла наклона пушки и величины тока в соленоиде подбирали ток фокусировки и ток пучка позволяющий получить гарантированное сквозное

проплавление. Выход на режим осуществляли в течение 2-х секунд, как на движущемся образце, так и на неподвижном. Процесс сварки завершали выключением ускоряющего напряжения. В ходе экспериментов установили, что при угле наклона пушки 20 и 30° стабильное формирование сварных швов с минимальным количеством вытекающего из сварочной ванны металла наблюдается при скоростях сварки 10 и 16 м/ч. В данных условиях при индукции магнитного поля соответствующей току в соленоиде $1,0 \dots 1,4$ А достигается оптимальная форма сварочной ванны, которая способствует удержанию жидкого металла в канале проплавления (рис. 7). При увеличении скорости выше 20 м/ч не удастся добиться качественного формирования, при этом наблюдается либо интенсивное разбрызгивание жидкого металла из канала проплавления, либо выплески металла из канала с лицевой стороны шва. При сварке без наклона пушки и без магнитного поля, на различных скоростях 10, 16, 20 м/ч наблюдаются большое количество вытекшего металла из сварочной ванны.

Для оценки качества сварных швов проводили рентгенографический контроль сварных соединений и изготавливали макрошлифы, по которым определяли следующие параметры: площади поперечного сечения швов $S_{ш}$, среднюю ширину шва $B_{ср} = S_{ш}/H$, погонную энергию, наличие дефектов, их площадь и долю дефектов в процентах $\psi = S_{\delta}/(L_{ш}H)100\%$, где S_{δ} – площадь дефектов, $L_{ш}$ – длина шва. Швы разделили на три группы: качественные швы – характеризуются отсутствием дефектов типа пор и полостей: $\psi = 0$; швы с единичными или случайными дефектами площадью менее 5%, возникшими вследствие нестабильности параметров режима сварки или других неявных внешних воздействий: $\psi < 5\%$; дефект-

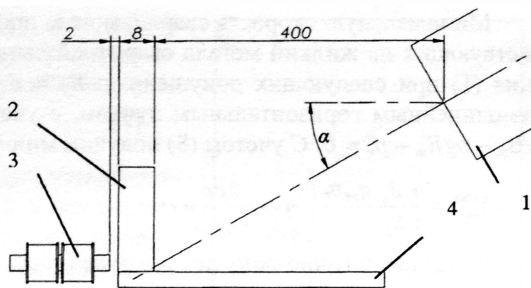


Рис. 6. Схема проведения экспериментов по сварке электронным пучком в магнитном поле: 1 – электроннолучевая пушка; 2 – свариваемые детали; 3 – соленоид с ферромагнитным сердечником; 4 – стол

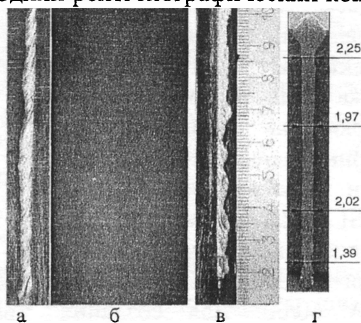


Рис. 7. Внешний вид (а), рентгеновский снимок (б), вид со стороны корня шва (в) и макрошлиф (г) образца толщиной 40 мм из стали ANSI 316L(N)

ные швы – характеризуются наличием дефектов относительной площадью $\psi > 5\%$. После чего определяли возможность получения качественных швов в зависимости от угла наклона сварочной электроннолучевой пушки, скорости сварки и других режимных параметров.

В результате исследований установили, что с увеличением угла наклона пушки и кривизны сварочной ванны погонная энергия, необходимая для проплавления образца на всю глубину увеличивается, при этом увеличивается ширина шва.

Зависимость средней ширины шва $B_{ср}$, мм от погонной энергии $q_{поз}$, кДж/мм для углов наклона 20° и 30° аппроксимировали линейными функциями (рисунок 8) и получили следующие уравнения: $B_{ср}(q_{поз}) = 0,277 q_{поз} + 1,1$, мм и $B_{ср}(q_{поз}) = 0,325 q_{поз} + 1,1$, мм соответственно. Из данных зависимостей видно, что постоянный член в уравнениях одинаков и равен 1,1 мм. Так как ширина шва не может быть меньше диаметра пучка, то в пределе она будет ему равна и, следовательно, составит величину свободного члена. Таким образом, проанализировав данные закономерности, можно сделать вывод, что свободный член представляет собой диаметр пучка и в данном случае его среднее значение в экспериментах составляло около 1,1 мм. Для комплексной оценки влияния параметров режима сварки на формирование швов построили зависимость относительной площади дефектов от угла наклона пушки и погонной энергии (рис. 9), а также зависимость относительной площади дефектов от погонной энергии и ширины шва (рис. 10). В результате

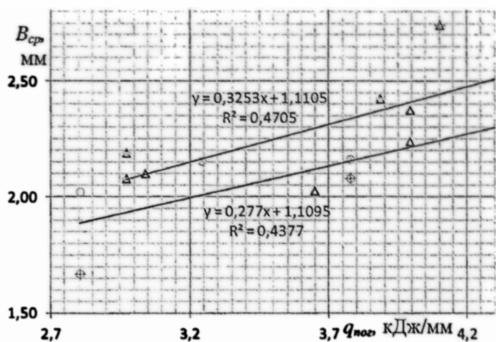


Рис. 8. Зависимость ширины шва от погонной энергии при различных углах наклона пушки

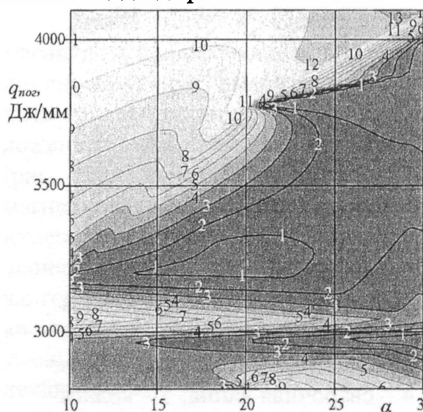


Рис. 9. Зависимость относительной площади дефектов ψ (%) от погонной энергии и угла наклона пушки

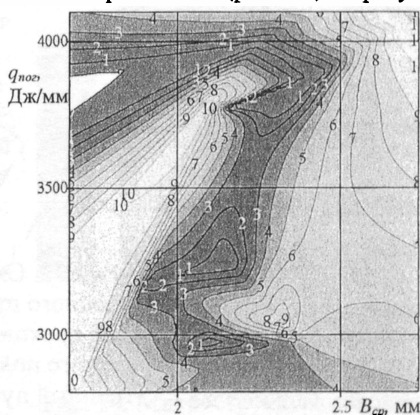


Рис. 10. Зависимость относительной площади дефектов ψ (%) от погонной энергии и ширины шва

тате установили, что с увеличением угла наклона пушки расширяется диапазон изменения погонной энергии, в котором наблюдается минимальная площадь дефектов. Например, при угле наклона 10° этот диапазон очень узок и составляет 3150...3200 кДж/м, при угле 20° - 3100...3500 кДж/м, при 30° - 2900...4000 кДж/м. При этом ширина бездефектного шва уменьшается от 2,5 до 1,8 мм, пропорционально снижению погонной энергии в диапазоне 3800...3000 кДж/м.

Глава 4. Оборудование и технология сварки с глубоким проплавлением в магнитном поле

В данной главе проведен анализ свариваемости аустенитной хромоникелевой стали ANSI 316L(N) и разработана технология изготовления сварных

крышек теплообменника несущей конструкции передней стенки (НКПС) модулей бланкетов ITER с помощью электроннолучевой сварки горизонтальным пучком в магнитном поле. Крышки представляют собой пластины из стали ANSI 316L(N), к которым привариваются биметаллические серыги из той же стали и бронзы (рис. 11). Разработанная технология позволяет получать качественные сварные соединения со свободным формированием шва, при этом не требуется применение корневых подкладок, снижается объем механической обработки и уменьшается расход материалов. Кроме того, при использовании криволинейных пучков изменяется положение катодного узла относительно направления потока паров металла из сварочной ванны с максимальной плотностью частиц. Таким образом уменьшается эффект катодного распыления и, следовательно, увеличивается ресурс катода и стабильность параметров электронного пучка с течением времени.

ЭЛС является сложным технологическим процессом с множеством варьируемых параметров. Использование систем, позволяющих в автоматическом

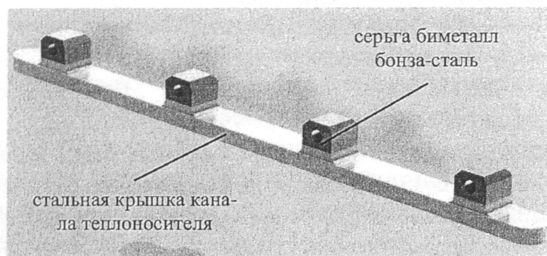


Рис. 11. Сварная биметаллическая крышка канала теплоносителя

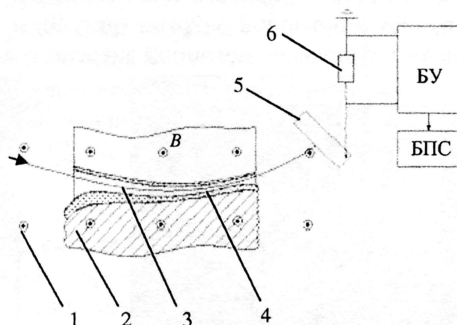


Рис. 12. Схема регулирования кривизны электронного пучка и канала проплавления по величине проходящего тока: 1 – вектор индукции магнитного поля; 2 – свариваемые изделия; 3 – электронный пучок; 4 – сварочная ванна; 5 – коллектор приема проходящего тока; 6 – шунт. БУ – блок управления, БПС – блок питания соленоида

режиме регулировать параметры процесса по получаемым из области воздействия сигналам, создает условия для эффективного управления процессом сварки. Приминительно к предложенному способу сварки можно использовать в качестве регулируемого параметра ток в соленоиде, а в качестве управляющего сигнала – проходящий ток пучка. Схема сварки с применением автоматического регулирования магнитного поля в канале по проходящему току пучка показана на рис. 12. Процесс регулирования осуществляется следующим образом. При проплавлении деталей часть тока электронного пучка через коллектор и шунт стекает на землю. Действительное значение тока шунта сравнивается с заданным номинальным значением проходящего тока в блоке управления. При превышении тока шунта над номинальным значением происходит увеличение тока в соленоиде, в результате чего магнитное поле в канале проплавления повышается. Это приводит к увеличению кривизны пучка, плавлению большего количества металла и уменьшению проходящего тока до номинального значения. Наоборот, в случае уменьшения величины проходящего тока через коллектор ниже номинального значения, или отсутствия сквозного проплавления, происходит уменьшение тока в соленоиде и индукции магнитного поля в канале проплавления до тех пор, пока ток через коллектор не сравняется с номинальным значением.

Кроме того, применение ЭЛС в магнитном поле позволяет снизить величину корневых пиков или же исключить их вовсе при сварке в нижнем положении с несковзным проплавлением (рис. 13). При приложении локального магнитного поля в корне шва вблизи него изменяется ориентация канала проплавления с вертикальной на наклонную или же горизонтальную, таким образом, в зависимости от величины магнитного поля, уменьшается амплитуда пилы, или вовсе исключается.

Особое внимание при внедрении технологических процессов уделяется эксплуатационным свойствам конструк-

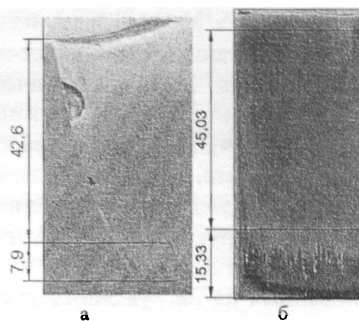


Рис. 13. Макрошлифы поперечного сечения швов при сварке в нижнем положении с применением магнитного поля (а) и без него (б)

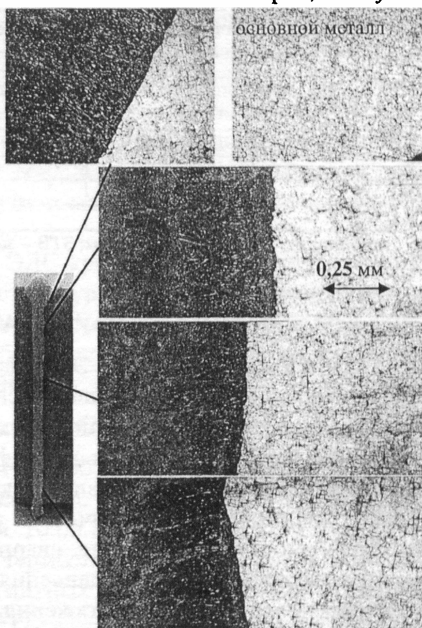


Рис. 14. Микроструктура сварного шва $H = 40$ мм из стали ANSI 316L(N)

ций, поэтому в работе проводили металлографические исследования и механические испытаниям сварных соединений, полученные с помощью разработанных способов. Металлографические исследования показали, что изменение структуры зоны термического влияния по глубине шва происходит не равномерно (рис. 14). В вершине шва и в корне наблюдается более интенсивный рост зерна аустенита, чем в центральной части. Это связано с неравномерным тепло-вложением вследствие криволинейной формы сварочной ванны. Тем не менее, изменение структуры происходит также как и при ЭЛС традиционными способами. Механические свойства исследовали с помощью безобразцовых методов, основанных на нагружении металла индентором с регистрацией диаграмм деформирования по параметрам восстановленного или невосстановленного отпечатков. Данные методы позволяют получить распределение механических характеристик и выявить зоны с наиболее неблагоприятными свойствами. В результате исследований механических свойств сварных соединений установили, что механические характеристики основного металла, зоны термического влияния и зоны проплавления находятся примерно на одном уровне. Характер изменения механических свойств сварных соединений выполненных электронным лучом на подъем в магнитном поле и традиционным методом ЭЛС в нижнем положении аналогичен, а абсолютные величины близки (таблица).

Таблица

Механические свойства сварных соединений

Зона сварного соединения	Средние значения $\sigma_f / \sigma_{0.2}$ полученные методом регистрации диаграмм деформирования, МПа		Средние значения $\sigma_f / \sigma_{0.2}$ полученные испытаниями на растяжение сварных соединений толщиной 80 мм, МПа
	ЭЛС горизонтальным пучком в магнитном поле	ЭЛС в нижнем положении изделий толщиной 8 мм	
МШ	579/357	632/383	512/374
ЗС	561/344	608/366	
ЗТВ	573/351	593/358	
ОМ	562/344	581/347	

МШ – металл шва; ЗС – зона сплавления; ЗТВ – зона термического влияния; ОМ – основной металл

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что при ЭЛС на подъем в поперечном магнитном поле сварочная ванна находится в равновесии, когда давление в парогазовом канале равно давлению от сил поверхностного натяжения, при этом гидростатическое давление не влияет на стабильность формирования сварных соединений. Поэтому создание канала проплавления криволинейной формы способствует расширению диапазона технологических режимов сварки, в котором обеспечивается стабильное формирование сварных соединений за счет значительного снижения гидростатического давления на жидкий металл сварочной ванны и увеличения поверхностного натяжения.

2. Показано, что заданные пространственные параметры пучка и форму канала проплавления можно получить за счет создания по всей толщине стыка свариваемых деталей локального поперечного магнитного поля, индукция которого изменяется по экспоненциальному закону. Предложены способы созда-

ния канала криволинейной формы для материалов с различными магнитными свойствами.

3. Разработана расчетно-экспериментальная методика определения траекторий электронов, позволяющая проводить оценку пространственных параметров пучка в зависимости от изменения поперечной составляющей индукции магнитного поля по толщине стыка.

4. Установлена зависимость характера течения жидкого металла в сварочной ванне, определяемого числом Рейнольдса, от параметров режима сварки, свойств материала и размеров шва. Данная зависимость позволяет определять максимальную критическую скорость сварки, при которой обеспечивается стабильное формирование сварных соединений.

5. Установлены зависимости минимальной критической скорости сварки электронным пучком на подъем в магнитном поле и без него от параметров режима сварки и размеров шва. Показано, что при использовании криволинейного пучка расширяется диапазон допустимых режимов сварки.

6. Установлено, что с увеличением угла наклона пушки до 30° расширяется диапазон изменения погонной энергии, при которой наблюдается минимальная площадь дефектов. При этом ширина бездефектного шва уменьшается пропорционально снижению погонной энергии.

7. Предложен способ ЭЛС в нижнем положении криволинейным пучком, позволяющий уменьшить амплитуду колебания глубины проплавления за счет перераспределения выделяемой при сварке энергии по глубине пароголового канала. Использование предложенного способа обеспечивает повышение качества сварных соединений при ЭЛС без сквозного проплавления.

8. Предложен способ автоматического регулирования формы канала проплавления при ЭЛС горизонтальным пучком на подъем, позволяющий повысить стабильность формирования сварных соединений за счет изменения пространственных параметров пучка в поперечном магнитном поле в зависимости от величины проходящего тока.

9. Показано, что при использовании ЭЛС криволинейным пучком сталей аустенитного класса характер изменения структуры и свойства металла шва и околосшовной зоны соответствует изменению структуры и свойств при ЭЛС традиционными способами. Результаты работы использованы для производства сварных конструкций НКПС бланкета ИТЭР.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Патент 2298465 RU C1, МПК В23К 15/00 В23К 28/02. Способ сварки / Р.М. Голубчик, В.К. Драгунов, А.П. Слива, А.И. Самолетов (РФ); МЭИ (РФ); 2005133499/02; Заявлено 01.11.2005; Опубл. 10.05.2007 Бюл. №13. 5 с.

2. Моделирование магнитных полей термоэлектрических токов в канале проплавления при ЭЛС ферро- и парамагнитных сталей / А.П. Слива [и др.] // Сварочное производство. 2006. №5. С.12-17.

3. Драгунов В.К., Слива А.П., Овечников С.А. Особенности применения электронно-лучевой сварки в производстве комбинированных конструкций из разнородных сталей // Тяжелое машиностроение. 2008. № 4. С. 15-21.

4. Драгунов В.К., Гончаров А.Л., Слива А.П. Пространственные параметры электронного пучка при взаимодействии с намагниченной мишенью // Сварочное производство. 2008. №12. С. 20-24., Welding International. 2010. № 7. С.552-556.

5. Мартынов В.Н., Хохловский А.С., Слива А.П. Электронно-лучевая сварка сталей, алюминиевых и титановых сплавов большой толщины // Сварочное производство. 2009. №12. С. 22-25.

6. Муравьева Т.П., Драгунов В.К., Слива А.П. Особенности структуры и свойств сварных соединений из толстолистовых сталей, выполненных электронно-лучевой сваркой // Сварочное производство. 2010. № 6. С. 38-42.

7. Количественная оценка степени ионизации паровой фазы в канале проплавления при электроннолучевой сварке / А.П. Слива [и др.] // Вестник МЭИ. 2010. № 6, С. 161-167.

8. Патент 2448822 RU 2448822 C1, МПК В23К 15/00 В23К 33/00. Способ сварки электронным лучом/В.К. Драгунов, А.П. Слива, В.А. Парфенов (РФ); МЭИ (РФ); 2010148580/02; Заявлено 30.11.2010; Опубл. 27.04.2012. Бюл. №12. 6 с.

9. Патент 2448821 RU 2448821 C1, МПК В23К 15/00 В23К 33/00. Способ сварки электронным лучом/В.К. Драгунов, А.П. Слива, Н.Н. Гаврилов (РФ); МЭИ (РФ); 2010148579/02; Заявлено 30.11.2010; Опубл. 27.04.2012. Бюл. №12. 6 с.

10. Особенности применения методов математического моделирования для определения параметров режима ЭЛС / А.П. Слива [и др.] // Сварочное производство. 2011. №3. С. 15-20.

11. Electron beam welding method in magnetic field / A. Sliva [et al.] // Elektrotechnika & elektronika E+E: Papers from 10-th International conference of electron beam technologies – EBT'2012. -Sofia, Bulgaria: 2012. Vol.47, №5-6. P. 128-133.