

**Е.С. Саломатова**

**E.S. Salomatova**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## **ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА – ОТ ИЗОБРЕТЕНИЯ ДО НАШИХ ДНЕЙ**

### **ELECTRON BEAM WELDING: FROM INVENTION TO OF OUR DAYS**

Рассмотрены предпосылки, подтолкнувшие ученых на изобретение электронно-лучевой сварки. Перечислены персоналии, чьи изобретения и научные теории стали общепринятыми в теории электронно-лучевой сварки.

**Ключевые слова:** ученые и изобретатели в области ЭЛС, предпосылки возникновения ЭЛС, электронно-лучевая сварка, вакуумная техника, высококонцентрированные источники тепла, трудносвариваемые материалы.

The prerequisites considered that prompted scientists to the invention of electron beam welding. Are personalities whose inventions and scientific theories are generally accepted in the electron-beam welding.

**Keywords:** scientists and inventors in the field of EBW, predictors of EBW, electron-beam welding, vacuum equipment, highly concentrated heat source, difficult to weld materials.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) явилась одним из перспективных и быстро развивающихся способов соединения различных металлов, в первую очередь тугоплавких, химически активных и разнородных качественных сталей, высокопрочных сплавов на основе алюминия и титана. Также этот способ сварки обладает широкими технологическими возможностями, позволяя соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 до 400 мм. При этом обеспечивается максимальная пластичность и вязкость сварных соединений.

Наиболее перспективным является соединение деталей из термически упрочненных материалов, когда затруднена или невозможна последующая термообработка. Максимальная пластичность и вязкость сварных соединений, минимальные сварочные деформации позволяют также успешно использовать ЭЛС при изготовлении изделий после завершающей механической обработки [1].

ЭЛС основана на использовании тепла, которое выделяется при торможении острогофокусированного потока электронов, ускоренных до высоких энергий. Явление термического воздействия электронных пучков на твердые материалы было известно давно. В частности, оно было отмечено в докладе В. Гроува (рис. 1), прочитанного в Лондонском Королевском обществе в апреле 1852 г.



Рис. 1. Вильям Роберт Гроув

Однако только благодаря развитию вакуумной техники и электронной оптики этот источник нагрева получил широкое применение сначала в сварочной, а затем в металлургической технике. Толчком, послужившим поиску новых способов соединения материалов, явились трудности сварки молибдена, тантала, ниобия, вольфрама, циркония, которые обнаружили в середине 60-х гг. прошлого века. Эти металлы составляют группу трудносвариваемых, так как обладают высокими температурой плавления и химической активностью. Это предполагает использование высококонцентрированных источников тепла и серьезной защиты зоны сварки [2].

В процессе ЭЛС в вакууме порядка  $10^{-4}$  мм рт. ст. обеспечивается практически полное отсутствие примеси вредных газов. Высокая концентрация энергии в электронном луче до  $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> при минимальной площади пятна нагрева до  $10^{-7}$  см<sup>2</sup> способствует уменьшению термических деформаций при сварке, незначительным структурным превращениям в зоне нагрева и обеспечивает формирование сварного шва с ярко выраженной кинжальной формой проплавления.

Разработка техники и технологии ЭЛС связана с работами французских и американских инженеров Д.А. Стора, Д. Бриолы, В.Л. Вимена, которые были опубликованы в 1957–1958 гг. У истоков появления ЭЛС стоял также К.Г. Штайгервальд (ФРГ). В эти же годы в СССР в Московском энергетическом институте под руководством Н.А. Ольшанского и в Институте электро-сварки им. Е.О. Патона под руководством Б.А. Мовчана, независимо от работ иностранных ученых, также были проведены исследования по применению электронного луча для сварки [2].

Разработка техники и технологии ЭЛС связана с работами французских и американских инженеров Д.А. Стора, Д. Бриолы, В.Л. Вимена, которые были опубликованы в 1957–1958 гг. У истоков появления ЭЛС стоял также К.Г. Штайгервальд (ФРГ). В эти же годы в СССР в Московском энергетическом институте под руководством Н.А. Ольшанского и в Институте электро-сварки им. Е.О. Патона под руководством Б.А. Мовчана, независимо от работ иностранных ученых, также были проведены исследования по применению электронного луча для сварки [2].

В начале 60 гг. XX в. Н.А. Ольшанский (рис. 2) и О.К. Назаренко одни из первых предложили теорию кинжального проплавления: электронный луч образует конус проплавления деталей, на передней стенке которого происходит равномерное распределение энергии. Перемещение луча относительно

детали приводит к непрерывному плавлению металла и переносу его в сторону, противоположную лучу (рис. 3). По этой теории образование глубокого проплавления представляется как стационарный процесс.



Рис. 2. Николай Александрович  
Ольшанский

В 1964 г. на основе экспериментальных данных, полученных при помощи скоростной киносъемки, американский ученый М. Шварц установил, что процесс взаимодействия луча и металла происходит за счет испарения и носит прерывистый характер. Им было также установлено, что распределение температур по глубине канала неравномерно: в корневой части канала  $T \sim 5000$  К, а у выходной части канала она минимальна и составляет 2500–3000 К.

И.В. Зуев в 1968–1967 гг. показал, что процесс внедрения электронного луча в металл с образованием канала происходит за счет периодического

выброса вещества вследствие взрывообразного испарения (вскипания) металла. Было установлено, что при плотностях мощности  $q = 10^9 \dots 10^{10}$  Вт скорость ввода тепла намного превышает скорость его отвода за счет теплопроводности, что приводит к взрывному вскипанию микрообъема вещества. Эта «взрывная гипотеза» позволила перейти к первым полуколичественным оценкам параметров процесса и получила подтверждение в ряде других работ.

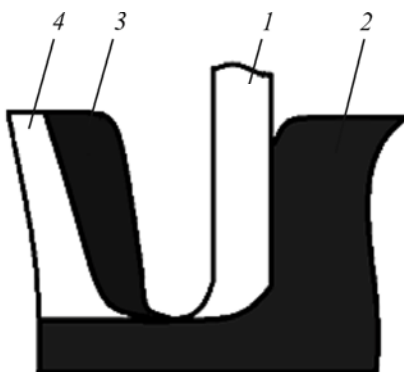


Рис. 3. Канал проплавления: 1 – электронный луч;  
2 – основной металл; 3 – расплавленный металл;  
4 – сварной шов

Теория формирования канала проплавления за счет периодических взрывов, предложенная И.В. Зуевым и Н.Н. Рыкалиным (рис. 4), оказалась очень плодотворной [3].



Рис. 4. Николай Николаевич Рыкалин



Рис. 5. Валерий Михайлович Язовских

В 1969 г. американские ученые Гид и Тонг провели экспериментальные исследования процесса образования канала с помощью киносъемки в рентгеновских лучах. Было установлено, что в жидком металле вокруг электронного луча существует полость. Эта полость все время находится в движении: глубина ее периодически колеблется от нулевой до максимальной с частотой 10–60 Гц. На основе этих исследований была предложена модель образования канала проплавления, основанная на гидродинамическом анализе процесса внедрения в жидкость тела, имеющего форму снаряда.

Красноярские ученые В.Д. Лаптенко, В.Я. Браверман внесли большой вклад в исследование возможности управления ЭЛС по рентгеновскому излучению из зоны сварки. В 1997 г. В.М. Язовских (рис. 5) и В.В. Уточкиным была установлена термодинамическая зависимость температуры испарения с давлением пара в канале проплавления при электронно-лучевой сварке, позволяющая с точностью прогнозировать глубину проплавления при ЭЛС.

С начала 90-х гг. учеными В.Я. Бельским, В.М. Язовских, Д.Н. Трушниковым ведется активное изучение механизма вторично-эмиссионных процессов при ЭЛС с глубоким проплавлением, с модуляцией электронного луча, со сквозным проплавлением,

а также исследуется возможности контроля процесса формирования сварного шва при ЭЛС [4–6]. В.Я. Бельский занимается вопросом формирования передней стенки каналов проплавления в металле при ЭЛС [7–9]. На счету этих ученых разработка целого ряда способов контроля процессов формирования сварных швов при ЭЛС и управления ими.

В.В. Мелюковым (рис. 6) разработан метод численного определения оптимальных режимов ЭЛС. Он нашел, как получать новые по форме конфигурации зон нагрева металла при сварке, и определил оптимальные комбинации источников, действующих одновременно, если этого требуют условия сварки. В.В. Мелюков разработал алгоритм непрерывного управления мощностью теплового источника при ЭЛС и предложил новшество – термоциклическую обработку, осуществляемую с помощью сварочного электронного луча путем многочисленных циклов нагрева-охлаждения по особой программе [10].

Стоит также отметить ученых из Санкт-Петербурга В.В. Башенко, Г.А. Туричина, которые внесли неоценимый вклад в исследования в области ЭЛС. Г.А. Туричин работает в области теоретических исследований, моделирования и разработки технологий лучевой обработки материалов, является одним из ведущих специалистов в этой области не только в России, но и за рубежом. Под его руководством и при его непосредственном участии проводятся исследования в области разработки новых и перспективных лазерных и гибридных технологий, в том числе технологического комплекса и базовой технологии для лазерно-дуговой сварки труб большого диаметра, разработаны программные комплексы для инженерного компьютерного анализа процессов лазерной, электронно-лучевой и гибридной сварки различных материалов [11–13].



Рис. 6. Валерий Васильевич Мелюков

Таким образом, ЭЛС является современным, прогрессивным способом соединения различных видов материалов и находит все новые и новые области применения в производстве.

### Список литературы

1. Башенко В.В., Вихман В.Б. Состояние и перспективы развития электронно-лучевой сварки // Технологии и оборудование электронно-лучевой сварки-2008: материалы I Санкт-Петербур. Междунар. науч.-техн. конф. – СПб.: ВиТ-Принт, 2008. – 210 с.
2. Шалимов М.П., Панов В.И. История сварки. Электронно-лучевые технологии [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/history/h8>.
3. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно-лучевой обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239 с. – (Библиотека Технолога).

4. Язовских В.М., Трушников Д.Н., Беленький В.Я. Тепловые процессы при электронно-лучевой сварке дуговых швов // Сварка и диагностика. – 2012. – № 5. – С. 26–31.
5. Математическое описание и анализ сварочных высококонцентрированных тепловых источников / В.Я. Беленький [и др.] // Вестник Ижев. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 3. – С. 46–50.
6. Использование параметров вторично-эмиссионного сигнала для управления проплавлением при электронно-лучевой сварке / Д.Н. Трушников [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2012. – № 1. – С. 175–181.
7. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д.Н. Трушников, В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.
8. Беленький В.Я. О формировании передней стенки канала проплавления в металле при электронно-лучевой сварке // ФХОМ. – 1987. – № 1. – С. 116.
9. Структура вторично-эмиссионного сигнала при электронно-лучевой сварке с глубоким проплавлением / Д.Н. Трушников, В.М. Язовских, В.Я. Беленький, Л.Н. Кротов // Сварка и диагностика. – 2008. – № 4. – С. 22–24.
10. Шишкин В.В. Валерий Мелюков: новое слово в электронно-лучевой сварке [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vyatsu.ru/nash-universitet/obrazovatel-naya-deyatel-nost/istoriya-kafedr/valeriy-melyukov-novoe-slovo-v-svarke.html.html>.
11. Моделирование динамического поведения сварочной ванны при лазерной и гибридной сварке с глубоким проплавлением / Г.А. Туричин, Е.А. Валдайцева, Е.Ю. Поздеева, Е.В. Земляков, А.В. Гуменюк // Автоматическая сварка. – 2008. – № 7. – С. 15.
12. Гибридная лазерно-дуговая сварка металлов больших толщин / Г.А. Туричин, И.А. Цибульский, Е.А. Валдайцева, А.В. Лопота // Сварка и диагностика. – 2009. – № 3. – С. 16–23.
13. Kinetic description of keyhole plasma in laser welding / U. Dilthey, A. Goumeniouk, V. Lopota, G. Turichin // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2000. – Vol. 33, № 21. – С. 2747–2753.

Получено 15.02.2012

**Саломатова Екатерина Сергеевна** – старший преподаватель, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: weld-katy@mail.ru).

**Salomatova Ekaterina Sergeevna** – Senior Lecturer, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: weld-katy@mail.ru).