

см 497910

Государственный комитет СССР по народному образованию
Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени Государственный
Технический Университет имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

БУРУИС ДЖАМАЛЬ

ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

05.03.06 - Технологии и машины сварочного
производства

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 1991

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена
Октябрьской Революции энергетическом институте

Научный руководитель - д.т.н., профессор Зуев И.В.
Официальные оппоненты - д.т.н., профессор Ямпольский С.М.
к.т.н., с.н.с. Гейкин В.А.
Ведущее предприятие - Научно-исследовательский
институт конструкторской
и монтажной технологии
(НИКИМТ)

Защита состоится "20" июня 1991 г. на заседании
специализированного Совета К 053.15.03 в Московском ордена
Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени Государственном Техническом Университете
им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская
ул. д. 5.

1 экз., заверенный печатью,
печатью.

Поместить в библиотеке МГТУ

" 06 1991 г.

Б.И. ГИРШ

М 497910

Актуальность проблемы

Около 50 лет назад академик Н.Н. Рыкалин для описания процесса проплавления основного металла при сварке ввел понятия теплового, эффективного и термического к.п.д.. Введение этих понятий существенно упрощало в инженерных расчетах связь между мощностью источника и глубиной и шириной проплавления (площадью поперечного сечения проплавления) в металле с учетом теплофизических свойств последнего и тепловой эффективности процесса. Для случаев действия быстро движущегося линейного источника в пластине и быстро движущегося точечного источника на поверхности полубесконечного тела академиком Н.Н. Рыкалиным были получены максимальные теоретические значения термического к.п.д. соответственно 0,484 и 0,368. С учетом того, что эффективный к.п.д. не зависит от процессов передачи тепла в металле, а определяется, как правило, внешними причинами и обычно представляет константу, определяющим тепловую эффективность процесса проплавления (полный тепловой к.п.д.) является термический к.п.д.. Таким образом, знание условий сварки, в которых реализуется максимальный термический к.п.д., позволило бы оптимизировать процессы сварки по минимуму тепловложения.

Однако, анализ литературных данных показывает, что ясности в том, как связаны режимы сварки с термическим к.п.д., мало. Более того, накапливаются экспериментальные данные, особенно для случаев использования концентрированных источников тепла (электронный луч, лазер и др.), показывающие, что величины термического к.п.д. могут превышать максимальные теоретические значения. Далее, не ясно, как определять термический к.п.д. для неподвижных источников, так как формально при скорости сварки, равной нулю, термический к.п.д. тоже равен нулю.

Одновременно в литературе есть экспериментальные данные, представляющие зависимость термического к.п.д. от скорости сварки и комплексных параметров сварки в виде кривых с максимумом. Кроме того, есть точки зрения, показывающие, что величина термического к.п.д. в значительной степени зависит от вида аппроксимации теплового источника в той или иной расчетной схеме.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1497910

Буруис Д. Тепловая эффектив...



Таким образом, попытка обобщения современных данных о термическом к.п.д. при сварке плавлением и электронно-лучевой сварке и разработка на экспериментальной основе рекомендаций по определению термического к.п.д. для ведения процесса сварки с максимальной (или какой-то заданной) тепловой эффективностью представляется актуальной.

Поэтому настоящая работа посвящена главным образом экспериментальному рассмотрению тепловой эффективности процесса электронно-лучевой сварки и определению зависимости термического к.п.д. от параметров режимов для построения более экономичных по тепловложению процессов сварки.

Цель работы.

Определение экспериментальных зависимостей термического к.п.д. от параметров режимов электронно-лучевой сварки сталей, алюминиевых и титановых сплавов и разработка методики расчета режимов электронно-лучевой сварки с учетом диапазона оптимальных значений термического к.п.д.

Методы исследования.

Получение проплавлений на нержавеющей стали и сплаве алюминия при различных значениях мощности и скорости (времени) сварки производилось на установке ЭЛА 60/60 (ускоряющее напряжение 60 кВ, мощность установки 60 кВт).

Площадь поперечных сечений макрошлифов определялась классическим методом планиметрирования.

Анализ структуры шва и околосшовной зоны проводили с помощью оптических микроскопов МИМ-7 и Неофот-2.

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили методами полиномиальной регрессии.

Научная новизна.

1. На основании анализа литературных данных и специально поставленных экспериментов установлен новый факт существования экстремальной (с максимумом) зависимости величины термического к.п.д. процесса электронно-лучевой сварки от параметров режимов (q/H) и (q/Hv).

2. Экспериментально установлено, что при электронно-лучевой сварке сталей аустенитного и перлитного классов максимальное значение термического к.п.д. 0,4-0,5 достигается при тепловложениях на уровне $(q/H) = 4-4,5$ кВт/см и $(q/H \cdot v) = 5,5-6,5$ кДж/см²; алюминиевого сплава - максимальное значение термического к.п.д. 0,17-0,25 достигается при $(q/H) = 4-6$ кВт/см и $(q/H \cdot v) = 5-6$ кДж/см², титанового сплава - максимальное значение $\eta_T = 0,6$ достигается при $(q/H) = 2$ кВт/см и $(q/H \cdot v) = 7,3$ кДж/см². Для сравнения, при дуговой сварке под слоем флюса максимальное значение термического к.п.д. $\sim 0,45$ соответствует энерговложению $(q/H \cdot v) = 30$ кДж/см².

Практическая ценность.

Разработана методика расчетов режимов электронно-лучевой сварки, позволяющая определять связь параметров электронного луча с геометрическими характеристиками сварного шва, выбирать скорость сварки, определять глубину и ширину шва с учетом экспериментальных зависимостей $\eta_T = f(q/H; q/H \cdot v)$. Полученные в работе экспериментальные значения термического к.п.д. для различных мощностей и скоростей сварки, а также для случаев проплавления металла неподвижным электронным лучом могут быть использованы в инженерной практике для выбора и уточнения параметров режимов электронно-лучевой сварки сталей, алюминиевых и титановых сплавов.

Реализация результатов работы.

Результаты работы в виде методики расчетов режимов электронно-лучевой сварки и справочных данных о величинах термического к.п.д. в различных условиях сварки сталей, алюминиевых и титановых сплавов внедрены на Московском агрегатном заводе "Дзержинец".

Апробация работы.

Основные положения работы докладывались на Второй международной конференции по электронно-лучевым технологиям ЭЛТ-88 (Варна) Болгария в 1988 г., Всесоюзной конференции "День Советской науки" в 1987-89 г.г., научно-технических конференциях "Концентрированные потоки энергии в технологии обработки и соединения материалов", г. Пенза, 1989, 1991 г.г., научных семина-

рах кафедры "Технология металлов" МЭИ, научно-технической конференции "Повышение эффективности сварки и упрочнения материалов концентрированными источниками энергии" г.Казань, 1991 г.

Публикации.

Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, отражающих основные результаты исследований.

Объем работы.

Диссертация включает введение, четыре главы, выводы, список литературы. Работа изложена на 168 страницах, включая 100 страниц текста, 55 рисунков, 19 таблиц, список литературы на 12 страницах из 105 библиографических наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава I содержит обзор современных представлений о процессе электронно-лучевой сварки и его тепловой эффективности, позволяющий сделать следующие выводы.

1. Техника электронно-лучевой сварки в СССР в результате чуть более тридцатилетнего развития характеризуется высоким уровнем теоретического обоснования технологии, надежной проработкой широкой гаммы технологических процессов ЭЛС, развитым парком электронно-лучевого оборудования. Об этом свидетельствуют материалы десяти Всесоюзных конференций, проводимых практически регулярно через два года, начиная с 1969 г. (последняя, десятая проведена в 1989 г.). Дальнейшее развитие ЭЛС, повицидому, будет связано с повышением уровня контроля и управления процессом, а также поиском новых технологических возможностей, особенно с учетом автоколебательного характера процесса формирования канала проплавления.

2. В то же время, как показывает анализ литературы, в этом достаточно хорошо изученном, разработанном и апробированном процессе не все ясно с его тепловой эффективностью, т.е. условиями оптимального тепловложения в металлы при сварке, которые определяются величиной термического к.п.д. Очевидно, что ведение процесса ЭЛС с максимальным η обеспечивает минимальное тепловложение,

что определяет размер зоны термического влияния, структуру этой зоны, механические свойства сварного соединения и в конечном счете — качество сварки.

Хотя роль термического к.п.д. в процессе ЭЛС привлекала внимание многих авторов, достаточно надежных представлений о тепловой эффективности ЭЛС в литературе нет. Ясно только, что термический к.п.д. существенно зависит от режимов сварки (мощность, скорость, концентрация мощности) и геометрических характеристик шва (глубина, ширина, коэффициент формы шва).

3. Достаточно четко констатируется факт: с увеличением удельной мощности и переходом от полусферической формы проплавления к конической тепловая эффективность (термический к.п.д.) возрастает в 3–5 раз. При этом регистрируются значения термического к.п.д. более 50%.

Можно предположить, что, так как переход к глубокому (кинжальному) проплавлению связан с интенсивным испарением материала и возбуждением автоколебаний температурного поля вследствие периодической экранировки электронного луча веществом (паром), существенное повышение термического к.п.д. в этом случае (в том числе более 50%) связано с процессами испарения и, видимо, более экономичной передачей тепла.

Задачи работы

1. Обобщение современных взглядов на процесс электронно-лучевой сварки и его тепловую эффективность.

2. Определение зависимостей термического к.п.д. от мощности сварки на единицу глубины шва (q/H) кВт/см, энергии сварки на единицу площади продольного сечения шва ($q/H \cdot v$) кДж/см² и выбор диапазона оптимальных значений термического к.п.д. ЭЛС.

3. Разработка методики расчета режимов электронно-лучевой сварки с учетом диапазона оптимальных значений термического к.п.д.

Глава 2 посвящена рассмотрению расчетных схем определения термического к.п.д. и выявлению зависимости термического к.п.д. от режимов электронно-лучевой сварки для сталей и алюминия по литературным экспериментальным данным.

Анализ классических работ Н.И. Рыкалина, а также работ Бере-

зовского В.М., *Swift-Hook* Д.Т., Арутюнян Р.В. и др. показал, что для случаев аппроксимации электронного луча линейным источником в пластине (Н.Н. Рыкалин, *Swift-Hook* Д.Т.), либо моделями цилиндрического источника тепла или плоского источника на передней стенке канала (Арутюнян Р.В. и др.) величина термического к.п.д. представляется соотношением

$$\eta_T = \frac{\nu F_{np}}{q_{np}} S_{nl} = \frac{\nu \cdot H}{q_{np}} \cdot S_{nl} \cdot B, \quad (I)$$

где F_{np} — площадь проплавления, H и B — глубина и ширина проплавления, q_{np} — эффективная мощность источника, S_{nl} — тепло-содержание расплавленного металла.

Максимальная величина η_T по выражению (I) составляет 0,484.

Однако в моделях цилиндрического источника и плоского на передней стенке канала ширина шва B в (I) может меняться при изменении диаметра канала за счет установления равновесия расплава на стенках канала в условиях, эквивалентных понижению температуры кипения в вакууме на 500 — 1000 К. Поэтому величина термического к.п.д. по (I) за счет изменения B составляет для Al $\eta_T = 0,72$, для Cu $\eta_T = 0,88$, для Fe $\eta_T = 0,93$. То есть учет давления пара в канале и поверхностного натяжения расплава приводит к значительному увеличению величины η_T в сравнении с максимально возможным $\eta_T = 0,484$.

Второй существенный момент при определении η_T заключается в том, что переход от схем сосредоточенных источников (точечный, линейный, плоский) к распределенным в пространстве, в частности, к схеме нормально-кругового на поверхности полубесконечного тепла приводит к существованию максимума η_T от режимов сварки (Березовский В.М.).

В этом случае η_T выражается соотношением

$$\eta_T = \frac{F_{np} \cdot \nu}{q_{np}} \cdot \frac{\lambda T_{пл}}{a}, \quad (2)$$

где λ — теплопроводность, a — температуропроводность, $T_{пл}$ — температура плавления.

Максимум в зависимости $\eta_T = f(q_{np} \cdot \nu / \lambda T_{пл} \cdot a)$ появляется из-за того, что при больших скоростях сварки ширина проплавления может оказаться меньше размера источника, тогда как при малых

скоростях ширина проплавления больше размера источника и весь тепловой поток вводится в область, ограниченную изотермой плавления.

Нелинейность зависимости q_T от параметров сварки для нормально-кругового источника связана с тем, что схема распределенного источника более точно описывает температурное поле в сравнении со схемой сосредоточенного источника.

Анализ экспериментальных зависимостей (рис. 1.2), показывает, что в реальных процессах электронно-лучевой сварки имеют место и максимум кривой зависимости q_T от режимов сварки и значения $q_T > 50\%$.

На рис. 1 представлена зависимость $q_T = f(q/H)$ для алюминиевого сплава, полученная при интерпретации данных фирмы Sciaky для случая воздействия электронного луча на неподвижный образец: $q = 6500$ Вт, $q_2 = 3,3 \cdot 10^6$ Вт/см², $d = 0,5$ мм (диаметр луча), время воздействия $t = 3,6$ с.

Как видно, эта зависимость имеет максимум. Правая часть кривой (справа-налево) характеризует процесс проплавления с момента $t = 0$ (холодный образец) до момента $t = 0,4$ с, когда интенсивное формирование канала заканчивается. Это соответствует максимуму термического к.п.д. Левая часть кривой соответствует процессу ввода энергии луча в материал в условиях, когда сильно растет ширина шва (площадь проплавления), а глубина со временем увеличивается незначительно. Другими словами, в данном конкретном случае, если после истечения времени $t = 0,4$ с луч перемещать относительно изделия со скоростью $v = B/t = 0,14$ см/0,4 с = 0,35 см/с, то это соответствовало бы максимальной тепловой эффективности сварки.

Величину термического к.п.д. для этого случая (неподвижный относительно изделия источник) определяли по формуле

$$q_T = \frac{H \cdot F_{\text{exp}}}{q_{\text{exp}} t} \cdot S_{\text{пл}}, \quad (3)$$

где t — время импульса.

На рис. 2 представлена зависимость q_T от параметра (q/H) для случая ЭЛС сталей перлитного и аустенитного классов толщиной 3 — 160 мм. Максимум термического к.п.д. составляет $q_T = 0,59$ (отдельные значения), величина тепловложения составляет 4–5 кВт/см.

Для уточнения зависимости на рис. 2 проведена статистическая обработка и численный анализ экспериментальных данных, полученных при сварке сталей различных классов.

Каждая репрезентативная группа экспериментальных наблюдений исследовалась методами полиномиальной регрессии. Проверка значимости регрессионных уравнений проводилась путем сравнения суммы квадратов регрессии относительно среднего значения и суммы квадратов отклонений относительно линии регрессии. Для оценки адекватности статистического описания принятого функционального типа находилось соотношение между средним квадратом неадекватности и средним квадратом чистой ошибки. В качестве критериальных статистик использовались табличные значения критерия Фишера уровня значимости 0,95.

Степень регрессионного уравнения выбиралась из условия достижения минимальной дисперсии рассеяния экспериментальных значений вокруг линии регрессии. Однако, для проведения последующего согласования регрессионных зависимостей, в окончательном варианте степени регрессионных кривых уравнивались для всех выборок данных, включенных в анализ.

Уравнение согласованной зависимости термического к.п.д. для всей совокупности данных, представленных на рис. 2, имеет вид

$$\begin{aligned} 0,212 + 0,0653 \left(\frac{q}{H} \right) + 0,16 \left(\frac{q}{H} \right)^2, \quad 2,1 \leq \left(\frac{q}{H} \right) < 2,6 \\ 0,079 + 0,181 \left(\frac{q}{H} \right) - 0,022 \left(\frac{q}{H} \right)^2, \quad 2,6 \leq \left(\frac{q}{H} \right) \leq 6,5 \quad (4) \\ 0,405 - 0,008 \left(\frac{q}{H} \right) + 0,0003 \left(\frac{q}{H} \right)^2, \quad 6,5 < \left(\frac{q}{H} \right) \leq 11,8 \\ \sigma_2 = 0,2 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Полученная зависимость позволяет определять оптимальные по эффективности режимы электронно-лучевой сварки сталей.

Глава 3 посвящена изложению результатов специальных экспериментов, направленных на выявление зависимости термического к.п.д. от режимов сварки нержавеющей стали и алюминиевого сплава.

Проплавление пластин толщиной 30 мм из упомянутых материалов проводили на серийной установке типа ЗЛА 60/60. Величину 2_r определяли на поперечных макрошлифах проплавлений методом планиметрирования. Пластин проплавляли в различных режимах: при постоянной скорости сварки, но разной мощности луча; при постоянной мощности луча, но разной скорости сварки; при разной мощности луча, но постоянном времени воздействия в режиме моноимпульса.

В экспериментах мощность луча составляла 0,5 – 8 кВт, скорость

сварки изменялась в пределах 0,1 - 0,78 см/с, время моноимпульса $t = 2$ с.

Зависимости $q_T = f(q/H)$ и $q_T = f(q/H \cdot v)$ для нержавеющей стали имеют явно выраженный максимум (см. например, рис. 3).

Максимальная величина q_T в этой серии опытов составляет 0,41, т.е. не превышает теоретического максимума для линейного источника в пластине.

Максимуму q_T в случае проплавления при $v = const$ и $t = const$ соответствует величина $(q/H) \approx 4,5$ кВт/см, что находится в согласии со значениями, полученными при обработке литературных данных (рис. 2).

В серии опытов, когда $q = const$ максимуму q_T соответствует $(q/H) \approx 3$ кВт/см. т.е. несколько меньше, чем в двух предыдущих случаях. Однако с учетом влияния скорости сварки эта разница существенно нивелируется и максимальным значениям q_T соответствует величина $(q/H \cdot v) = 5,5 - 6$ кДж/см², которая также хорошо совпадает со значениями, полученными при обработке литературных данных.

Аналогичные результаты получены для алюминиевого сплава: зависимости $q_T = f(q/H)$ и $q_T = f(q/H \cdot v)$ также имеют максимум (рис. 4).

Максимальная величина q_T в этих опытах составляет 0,165, много ниже, чем для стали. Обращает на себя внимание, что максимальное значение q_T для алюминиевого сплава, полученное при обработке данных фирмы *Sciaky*, также низкое в сравнении со сталями ($q_{T \max} = 0,25$, рис. 1). Представляется, что это связано с теплофизическими свойствами алюминия, в частности с его высокой теплопроводностью.

Максимуму q_T для случаев воздействия при $v = const$ и $t = const$ соответствует примерно одинаковая величина (q/v) , равная 4 - 4,3 кВт/см. Максимум для случая $q = const$ в этом отношении также, как и для стали, смещен в меньшую сторону ($q/v = 2,7$ кВт/см). С учетом скорости сварки максимум q_T соответствует величине $(q/H \cdot v) = 5,5$ кДж/см².

В главе 3 представлены также результаты обработки экспериментальных данных Писарева Ю.И., Каплана А.А., Герасименко А.В. и др., полученных при электронно-лучевой сварке титанового сплава.

Были обработаны данные для следующих режимов: $q = 6 - 54$ кВт, $v = 10$ м/ч, глубина проплавления $H = 30 - 108$ мм, ток фокусировки 100 мА (электронно-лучевая установка с энергоблоком У905 М).

Установлено, что экстремальный характер зависимостей $z_r = f(q/H)$ и $z_r = f(q/Hv)$ имеет место и для титанового сплава.

При этом максимальное значение $z_r = 0,62$ существенно превышает максимальное теоретически возможное для линейного источника ($z_r = 0,484$).

Отметим, что в этих экспериментах мы имеем случаи очень глубокого проплавления (до 110 мм) при значительных мощностях электронного луча (до 54 кВт). В таких условиях, возможно, линейная аппроксимация источника становится неадекватной, что и приводит к повышению значений z_r .

Величина (q/H) , соответствующая максимуму z_r составляет 2 кВт/см и, как видно, значительно ниже, чем для нержавеющей стали и алюминиевого сплава. Видимо это связано с теплофизическими свойствами титана и, в частности, с его низкой теплопроводностью.

Величина (q/Hv) , соответствующая максимуму z_r , составляет $\sim 7,3$ кДж/см², что несколько выше, чем для стали и алюминия ($\sim 5,5$ кДж/см²).

Заключает главу 3 раздел, посвященный влиянию термического к.п.д. на структуру и размеры зоны термического влияния.

Для исследования микроструктуры зоны термического влияния были выбраны четыре образца из нержавеющей стали: два из них выполнены при $v = \text{const}$, два — при $q = \text{const}$. В каждом из двух образцов один выполнен при $z_r = \text{max}$, другой — при $z_r = \text{min}$.

Анализ микроструктур дает тривиальный результат: с уменьшением ширины зоны термического влияния уменьшается размер зерна и при ширине з.т.в. = 0,2 — 0,3 мм микроструктура наиболее благоприятна с точки зрения механических свойств сварного соединения.

Нетривиальность полученных результатов заключается в следующем. Для случая сварки при $q = \text{const} = 5$ кВт, когда максимальное значение $z_r = 0,37$ достигается при $v = 0,44$ см/с и глубине проплавления $H = 18$ мм, ширина зоны термического влияния составляет 0,2 мм. Минимальное значение $z_r = 0,26$ достигается при $q = \text{const} = 5$ кВт, $v = 0,11$ см/с и глубине проплавления

$H = 25$ мм. Этому случаю соответствует ширина з.т.в. = 1,6 мм и значительный рост зерна.

Таким образом, отклонение на 30% от максимального значения привело к увеличению з.т.в. в 8 раз и значительному ухудшению микроструктуры.

Примерно аналогичный результат получен и для второй пары образцов.

Из приведенных фактов следует, что достижение при сварке максимальной глубины проплавления не всегда оптимально с точки зрения тепловой эффективности и соответственно, структуры околошовной зоны.

Глава 4 посвящена разработке методики расчета режимов электронно-лучевой сварки на базе полученных экспериментальных данных.

Рассмотрена связь эффективной мощности теплового источника с законом нормального распределения ее в пространстве в виде $q_{эф} = \pi q_{\text{гт}} / K$, где $q_{\text{гт}}$ — максимальный тепловой поток (удельная мощность) на оси электронного луча, K — коэффициент сосредоточенности.

По аналогии с этим законом объем зоны проплавления V , полученный в течение импульса длительностью t (точечное проплавление) выражен в виде $V = \pi H_{\text{max}} / K^*$, где H_{max} — максимальная глубина проплавления, K^* — коэффициент, аналогичный коэффициенту сосредоточенности, определяющий геометрический характер изменения изотермы плавления.

На основе этой зависимости с учетом того, что комплексные параметры ЭЛС (q/H) , $(q/H \cdot v)$, а также z_r для стали, алюминиевого и титанового сплавов определены в работе количественно, связь геометрических характеристик сварного шва с режимами сварки и теплофизическими свойствами материалов получена для импульсного режима в следующем виде

$$B_e = \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{t}{s_m} \cdot \frac{q_{эф}}{H} z_r \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где B_e — эквивалентная ширина сварного шва на уровне H/e ,
 e — основание натурального логарифма.

Представляя процесс формирования сварного шва, как суперпозицию точечных проплавлений с временем импульса $t = d/v$, где

d – диаметр источника (диаметр электронного луча), v – скорость перемещения источника, для непрерывного режима сварки из (5) можно записать:

$$B_c = \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{d}{S_w} \cdot \frac{q_{22}}{\sigma \cdot H} \cdot Z_T \right)^{1/2} \quad (6)$$

Для величины d в работе получено следующее выражение

$$d = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{q_{22}}{H \cdot v} / S_{\text{кпл}} \quad (7)$$

где $S_{\text{кпл}}$ – теплосодержание кипящего металла.

Методика расчета режимов ЭИС однородных материалов с несквозным проплавлением сводится к следующему алгоритму:

1. Задается глубина проплавления H .
2. Мощность сварки q определяется из величины отношения (q/H), значения которого приведены в таблице.
3. Скорость сварки v определяется из величины соотношения ($q/H \cdot v$), см. таблицу.
4. По формуле (7) определяется d .
5. По формуле (4) или из таблицы определяется Z_T .
6. По формуле (6) определяется эквивалентная ширина шва B_c .
7. Выбирается оборудование и методы контроля и управления диаметром луча d .

Настоящая расчетно-экспериментальная методика ограничена следующими толщинами материалов: сплав алюминия – до 28 мм, титановый сплав – до 108 мм, сталь – до 25 мм. Точность расчета – в пределах 10%.

Настоящая методика использована на Московском агрегатном заводе "Дзержинец" для проектирования технологии электронно-лучевой сварки изделий.

ВЫВОДЫ

1. Тепловая эффективность проплавления основного металла при сварке определяется тепловым к.п.д., то есть произведением эффективного и термического к.п.д. Для электронно-лучевой сварки с глубоким проплавлением эффективный к.п.д. практически равен единице, поэтому тепловая эффективность ЭИС фактически определяется величиной термического к.п.д., который существенно влияет на величину тепловложения в основной металл, размер и структуру зоны термического воздействия.

ческого влияния и соответственно на механические свойства и качество сварного соединения.

2. Анализ расчетных схем для определения термического к.п.д., имеющихся в литературе, показывает, что величина термического к.п.д. и характер зависимости его от параметров режимов сварки в значительной степени зависят от вида аппроксимации. Переход от аппроксимации электронного луча линейным источником с максимальным значением $2_T = 0,484$ к схеме тепловыделяющего полого цилиндра и схеме плоского источника на передней стенке канала с учетом равновесия расплава на стенке канала в данной газовой среде (вакуум, атмосфера) приводит к повышению величины термического к.п.д. существенно более 50%. Переход от схем сосредоточенных источников (точечный, линейный, плоский) к распределенным в пространстве, в частности, к схеме нормально-распределенного кругового источника, приводит к существованию максимума зависимости 2_T от режимов сварки, геометрических характеристик сварного шва и теплофизических свойств материала. Все это говорит о значительной нелинейности процессов передачи тепла в канале проплавления (сварочной ванне) при ЭЛС, связанной помимо с автоколебаниями температурного поля.

3. Статистическая обработка достаточно большого массива экспериментальных данных методами полиномиальной регрессии, а также анализ данных, полученных на базе специальных экспериментов, показывает, что при электронно-лучевой сварке сталей, алюминиевых и титановых сплавов зависимость 2_T от параметров сварки вида (q/H) и $(q/H \cdot v)$, где q — эффективная мощность луча, H — глубина проплавления, v — скорость сварки, имеет характер кривой с максимумом.

4. Экспериментально установлено что при электронно-лучевой сварке максимальное значение термического к.п.д. для сталей имеет значение порядка $2_T = 0,4 - 0,5$ при $(q/H) = 4 - 4,5$ кВт/см и $(q/H \cdot v) = 5,5 - 6,5$ кДж/см²; для титанового сплава $2_T = 0,6$ при $(q/H) = 2$ кВт/см и $(q/H \cdot v) = 7,3$ кДж/см²; для алюминиевого сплава $2_T = 0,17 - 0,25$ при $(q/H) = 4 - 6$ кВт/см и $(q/H \cdot v) = 5 - 6$ кДж/см².

5. Установлено, что при электронно-лучевой сварке нержавеющей стали 12Х18Н10Т максимальному значению термического к.п.д. соответствует минимальный размер зоны термического влияния и наиболее благоприятная с точки зрения механических свойств её микрострук-

тура. Так, при $\eta_r = 0,41$ глубина проплавления $H = 11$ мм и ширина з.т.в. составляет $\delta = 0,2$ мм, при $\eta_r = 0,37$ $H = 16$ мм и $\delta = 0,3$ мм, при $\eta_r = 0,26$ $H = 25$ мм и $\delta = 1,6$ мм. Достижение максимальной глубины проплавления в случае не всегда оптимально с точки зрения тепловой эффективности и структуры околошовной зоны.

6. На базе значительного количества справочных данных о связи η_r с параметрами режимов сварки q , H , v и др. для случая сварки однородных материалов с несквозным проплавлением разработана методика расчетов режимов электронно-лучевой сварки, позволяющая определять связь мощности электронного луча с глубиной и шириной сварного шва при данной скорости сварки в режиме максимальной тепловой эффективности с учетом экспериментальных зависимостей $\eta_r = f(q/H; q/H \cdot v)$.

7. Результаты работы в виде методики расчетов режимов электронно-лучевой сварки и справочных данных о величинах термического к.п.д. при различных режимах сварки сталей, алюминиевого и титанового сплавов использованы на Московском агрегатном заводе "Дзержинец" для проектирования технологии электронно-лучевой сварки специзделий.

Основное содержание опубликовано в работах:

1. Зуев И.В., Буруис Дж. Тепловая эффективность процесса электронно-лучевой сварки //Сб.научн. трудов Моск. энерг. ин-та. - 1987. - № 137.-С.- 5-8.

2. Зуев И.В., Буруис Дж. Тепловая эффективность процесса электронно-лучевой сварки. // Труды Второй международной конференции по электронно-лучевым технологиям ЭЛТ-88.- Варна (Болгария) 1988. - С. 492-495.

3. Зуев И.В., Буруис Дж., Онищук В.Е. Выбор режимов электронно-лучевой сварки с учетом тепловой эффективности процесса проплавления металла. //Сб.научн.трудов Моск. энерг. ин-та. - 1989. - № 207.- С.- 9-14.

4. Зуев И.В., Буруис Дж., Кудеша К. Экспериментальная зависимость тепловой эффективности электронно-лучевого нагрева //Концентрированные потоки энергии в технологии обработки и соединении материалов: Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции.- Пенза.-1989.-С. 5.

5. Зуев И.В., Буруис Дж. Зависимость термического к.п.д. от режимов ЭЛС. // Современные проблемы физики и её приложений: Тезисы докладов Всесоюзной конференции "День советской науки". - М. - 1987. - Часть II. - С. III.

6. Артингер И., Буруис Дж., Трофимов А.Н. О тепловой эффективности проплавления металла при ЭЛС сталей. // Сб. науч. трудов Моск. энерг. ин-та. - 1989. - № 207. - С. 74-77.

01656411

Экспериментальные значения комплексных параметров ЭИС,
соответствующих максимальному значению 2_T

Табл.

Параметр M_c	Al	Ti	Нерж. сталь
$\frac{P_{\text{вх}}}{H \cdot \gamma}, \frac{\text{кДж}}{\text{см}^2}$	5,35	7,3	5,5
$\frac{P_{\text{вх}}}{H}, \frac{\text{кВт}}{\text{см}}$	4,2	2,0	4,3
2_T max	0,165	0,62	0,41

Подписано к печати

Печ. л. 1,25

Л. 22/10-91

Тираж 100

Заказ 791

Бесплатно.

Типография МЭИ, Красноказарменная, 13.