

М 334668



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКОЕ
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

ШЕВЧЕНКО ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПУТЕЙ
ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА
ФОРМИРОВАНИЯ СВАРНОГО ШВА ПРИ ЭЛС**

Специальность — 05.04.05 — Технология и машины
сварочного производства

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

Москва — 1979

Работа выполнена в Московском ордена Ленина энергетическом институте.

Научный руководитель:

заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор **Н. А. Ольшанский.**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, старший научный сотрудник **О. К. Назаренко.**

кандидат технических наук, доцент **Ю. Н. Зорин.**

Ведущее предприятие — дважды ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени Московский автомобильный завод им. И. А. Лихачева.

Защита состоится «.....» 1979 г.

В час.

ванного Совета ДС
рочного производст
Трудового Красног
имени Н. Э. Баума
ская ул., 5.

С диссертацией
им. Н. Э. Баумана

Автореферат ра

Ученый секр
специализированн

доктор техниче
професс

М 334668

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Электроннолучевая сварка (ЭЛС) относится к прогрессивным технологическим процессам, обеспечивающим высокий уровень комплексной механизации и автоматизации, экономное расходование энергии, материалов и затрат человеческого труда. Значительное внимание в работах последних лет по ЭЛС металлов уделялось выяснению физической сущности протекающих при электроннолучевой сварке явлений и их роли в процессе формирования сварного соединения. Хотя физическая картина ЭЛС в основных аспектах ясна, но к настоящему времени еще нет единого мнения по многим основополагающим вопросам. Это в значительной степени предопределило трудности в более широком внедрении в производство электроннолучевой сварки металлов средних и больших толщин. Основным сдерживающим фактором в этой проблеме является нестабильность процесса формирования сварного шва.

Цель работы. Диссертационная работа посвящена экспериментальным и теоретическим исследованиям процесса образования сварного шва для изыскания средств практического повышения стабильности и качества его формирования.

Методы исследования. В процессе выполнения работы применялись аналитические расчеты, высокоскоростная цветная киносъемка движения металла в сварочной ванне, использование маркирующих материалов, изучение макро- и микрошлифов, проведение механических испытаний сварных соединений, зондирование электронных пучков вращающимся вондом. Основной объем исследований выполнен применительно к сталям 12Х13, 12Х18Н10Т, 20Х1А1 и сплавам АМг6 и ВТ22 толщиной до 25 мм.

Научная новизна. Развита теория переноса металла в сварочной ванне. Предложен и обоснован механизм переноса жидкого металла из зоны плавления в зону кристаллизации, на основе которого разработана оригинальная методика определения основных параметров металлопереноса. Показано, что значение максимальной толщины металла, качественно свариваемой за один проход, ограничено гидродинамикой металлопереноса.

Практическая ценность. Построена номограмма для выбора оптимальных параметров ЭЛС, обеспечивающих повышение стабильности формирования сварного шва и его качества. Установлено,

что применение ЭЛС горизонтальным пучком на вертикальной плоскости создает лучшие условия для бездефектного формирования шва и дает возможность производить сварку в более широком диапазоне ее мощностей и скоростей.

Реализация работы в промышленности. Разработанная технология сварки разнородных сталей, обеспечивающая получение качественного сварного соединения при высокой стабильности формирования шва, внедрена на одном предприятии.

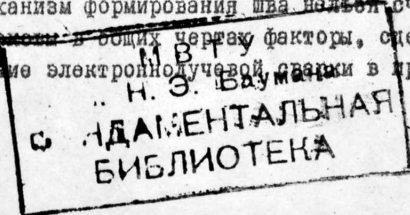
Апробация работы. Диссертационная работа и ее отдельные разделы доложены на Научной конференции Московского энергетического института (Москва, 1975), научно-технической конференции "Результаты научных разработок и опыт применения сварки на московских предприятиях" (Москва, 1976), Научно-технической конференции сварщиков Урала (Пермь, 1977, Челябинск, 1978), Всесоюзной научной конференции "Современные проблемы энергетики и электротехники" (Москва, 1977), научном семинаре МВТУ им. Н.Э.Баумана (Москва, 1977), научном семинаре ИЭС им. Г.О. Патона (Киев, 1978), заседании кафедры "Технология металлов" МЭИ (Москва, 1977).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и списка литературы из 128 наименований. В приложении помещен акт внедрения. Работа содержит 115 страниц машинописного текста, 46 рисунков, 14 таблиц.

Содержание работы. Во введении отражена актуальность темы, кратко изложено содержание диссертации и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние электроннолучевой сварки и поставлена задача исследований. Проведенный анализ опубликованных исследований (Н.А. Ольшанский, О.К. Назаренко, Г.И. Лесков, В.В. Башенко, Н.Н. Рыкалин, А.А. Углов, И.В. Зуев, Ф.Н. Рыжков, И. Арата, И. Рассел, Х. Тонг, В. Гидт с сотрудниками и др.) показал, что при ЭЛС металлов с глубинным проплавлением стабильность процесса формирования сварных швов очень низкая и в них возникают различные дефекты, а механизм формирования шва нельзя считать до конца выясненным. Тем не менее в общих чертах факторы, сдерживающие дальнейшее внедрение электроннолучевой сварки в производство.



Главным вопросом при изучении процесса формирования сварного шва является вопрос об основном направлении перетекания расплава в сварочной ванне и силовых факторах, которые его обеспечивают.

Вторая глава посвящена описанию методики исследований и результатов изучения переноса металла в сварочной ванне. Для экспериментального исследования процесса перемещения расплавленного металла выбраны следующие две методики: использование маркирующих материалов и цветную высокоскоростную киносъемку.

Экспериментально установлено, что характер распределения маркирующего материала в шве остается общим для всех исследованных металлов (Zr, Ta, Cu, Ti) и имеет форму, изображенную на рис. 1.

Эти результаты указывают на направленное перетекание расплавленного металла в ванне в направлении, обратном направлению сварки. С учетом факта существования при ЭДС канала проплавления (кратера) можно предполагать, что расплав в основном переносится из зоны плавления в зону кристаллизации ванны по боковым стенкам кратера в направлении, обратном направлению сварки.

Оценим возможность такого направленного перетекания металла в сварочной ванне за счет реакции отдачи испаряющихся частиц и термокапиллярного эффекта.

Гипотеза, которая связывает металлоперенос с силовым воздействием испаряющихся в зоне плавления сварочной ванны частиц предполагает существование определенного градиента давлений между передним и задним фронтами канала проплавления, за счет которого может перетекать расплав.

Для создания и поддержания необходимого градиента давлений между зонами плавления и кристаллизации за счет испарения необходимо, чтобы частицы, испарившиеся с передней части кратера, не смогли бы достигнуть его задней части и сконденсироваться. Справедливость такого условия очевидна, т.к. в случае последующей конденсации частиц суммарный импульс силы, переданный частицами поверхности испарения будет равен суммарному импульсу

силы, сообщенному поверхности конденсации и, следовательно, никакого градиента давлений между зонами плавления и кристаллизации в кратере создать не удастся.

Вышеизложенное означает, что для создания необходимого градиента давлений, обеспечивающего металлоперенос в сварочной ванне за счет испарения частиц, подавляющее количество испаряющегося материала должно удаляться из кратера без конденсации.

Результаты проведенного анализа, при котором процесс испарения свариваемого металла в канале проплавления описывался уравнением Ленгмюра, а течение пара в кратере — законом Кнудсена, указывают на отсутствие в реальных процессах ЭЛС возможности создания градиента давлений между зонами плавления и кристаллизации в кратере за счет испарения частиц. Значит, испарение вещества в зоне воздействия электронного луча не обеспечивает металлоперенос в направлении, обратном направлению сварки.

Приняв толщину пленки, определенную в случае соблюдения всех условий для нормального проявления термокапиллярного эффекта, можно определить объемный расход расплава, переносимого в ванне за счет этого эффекта. Проведенные расчеты по такой методике показывают, что в эксперименте за счет термокапиллярного эффекта переносятся из зоны плавления в зону кристаллизации примерно только 19,5% расплавляемого металла от необходимого для нормального формирования шва.

Таким образом установлено, что наблюдаемый в экспериментальных условиях металлоперенос из зоны плавления в зону кристаллизации сварочной ванны с позиций существующих гипотез неясен. Поэтому необходимо обосновать процесс переноса расплава в направлении, обратном направлению сварки при ЭЛС.

В третьей главе развиты элементы теории металлопереноса. Причину переноса металла при ЭЛС будем искать в нарушении термодинамического равновесия, вызванного несимметричным расположением источника тепла в кратере. Рассмотрим движение изотермического потока вязкой жидкости в отсутствие силы тяжести. Давление под поверхностью жидкого металла P определяется уравнением (см. расчетную схему на рис.2)

$$P = P_0 - \frac{6\gamma}{r_1}, \quad (1)$$

где P_i — давление пара над поверхностью жидкости, дин/см^2 ,

r_i — радиус кривизны поверхности пленки в сечении перпендикулярном оси кратера (кривизной в осевом сечении пренебрегаем), см ; σ_i — поверхностное натяжение расплавленного металла, дин/см .

Учитывая большую величину тепловой скорости разлета испаряющихся частиц, можно принять давление пара примерно одинаковым у зон плавления и кристаллизации ванны и равным среднему статическому давлению паров в канале проплавления, т.е. $P_i \approx P_{\text{кр}} \approx \text{const}$.

Тогда разность давлений в жидкой фазе между зонами плавления и кристаллизации сварочной ванны с учетом уравнения (1) можно представить в виде

$$\Delta P = \frac{\sigma_{\text{ф.к.}}}{r_{\text{ф.к.}}} - \frac{\sigma_{\text{ф.п.}}}{r_{\text{ф.п.}}}, \quad (2)$$

где индексы "ф.п." и "ф.к." относятся к зонам плавления и кристаллизации соответственно.

Известно, что для металлов поверхностное натяжение является линейной функцией температуры, причем температурный коэффициент поверхностного натяжения $\partial\sigma/\partial T < 0$, т.е. σ уменьшается с ростом температуры. Считая градиент температур в поперечном сечении сварочной ванны постоянным, найдем

$$\sigma_{\text{ф.п.}} = \sigma - (T_{\text{ф.п.}} - T_{\text{ф.к.}}) \left| \frac{\partial\sigma}{\partial T} \right|, \quad (3)$$

где σ — поверхностное натяжение расплава при $T_{\text{ф.к.}}$, примерно равной температуре плавления металла ($\sigma_{\text{ф.к.}} = \sigma$), дин/см ,

Преобразовав выражение (2) с учетом (3), получим

$$\Delta P = \frac{\Delta T}{r_{\text{ф.п.}}} \left| \frac{\partial\sigma}{\partial T} \right| + \frac{r_{\text{ф.п.}} - r_{\text{ф.к.}}}{r_{\text{ф.п.}} r_{\text{ф.к.}}} \sigma, \quad (4)$$

здесь $\Delta T = T_{\text{ф.п.}} - T_{\text{ф.к.}}$ — разность температур жидкой фазы между зонами плавления и кристаллизации в поперечном сечении сварочной ванны ($T_{\text{ф.п.}} > T_{\text{ф.к.}}$).

Значит, за счет имеющегося градиента температур и поверхностного натяжения свободной поверхности слоя расплава в поперечном сечении кратера /первое слагаемое в уравнении (4)/ и кривизны пленки /см. зависимость (4) при ЭЛС жидкий металл будет перемещаться из зоны плавления в зону кристаллизации под действием разности давлений ΔP .

Так как толщина слоя жидкого металла гораздо меньше радиуса кривизны его свободной поверхности (по данным киносъемки), течение жидкости можно описать уравнением Рейнольдса

$$\mu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} = - \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (5)$$

где μ — коэффициент динамической вязкости расплава, дин.с/см^2 ; w_x — скорость его течения в направлении оси x , см/с (см. рис.3).

Принимая значение градиента скоростного давления $\frac{\partial P}{\partial x} = \text{const}$ и на основании данных высокоскоростной киносъемки $\tau_{\text{р.п.}} \approx \tau_{\text{р.к.}} \approx \frac{\beta - 2h}{2}$, найдем решение уравнения (5) при следующих граничных условиях:

$$\begin{aligned} w_x &= 0 \quad \text{при } y=0, \\ -\frac{\partial w_x}{\partial y} &= 0 \quad \text{при } y=h \end{aligned}$$

в виде

$$w_{\text{ср}} \approx \frac{2}{3\mu} \left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right| \frac{h^3}{\beta - 2h}, \quad (6)$$

где $w_{\text{ср}}$ — средняя скорость течения расплава в пленке, см/с ; $\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right|$ — градиент температур в поперечном сечении сварочной ванны, град/см ; β — ширина шва, см ; h — средняя толщина пленки расплава на фронте плавления ванны, см .

Объем расплавленного в единицу времени металла при ЭЛС можно определить из зависимости

$$C = H B V_{\text{св}}, \quad (7)$$

где Q – объемный расход расплава, см³/с; $V_{св}$ – скорость сварки, см/с; H – глубина проплавления, см.

Из сравнения расходов металла в ванне, определяемого выражением (7) и через среднюю скорость течения в пленке, найдем следующую зависимость для определения средней толщины слоя расплава в зоне плавления:

$$h \approx \left(\frac{3}{4} \frac{\mu V_{св} B^2}{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| \left| \frac{\partial T}{\partial x} \right|} \right)^{1/3} \quad (8)$$

Корректность предлагаемой модели процесса металлопереноса в направлении, обратном направлению сварки, подтверждается результатами, которые получены в эксперименте с маркирующими материалами, и высокоскоростной киносъемки (см. табл. I).

Таблица I

Сводные данные параметров металлопереноса

Параметр	Расчет	Эксперимент
Средняя толщина пленки жидкого металла h , см	$1,20 \times 10^{-2}$	$1,22 \times 10^{-2}$
Средняя скорость течения расплава $w_{ср}$, см/с	3,02	2,73
Расход расплава Q , см ³ /с	$3,625 \times 10^{-2}$	$3,33 \times 10^{-2}$

С помощью высокоскоростной цветной киносъемки в работе получено прямое экспериментальное подтверждение устойчивого пленочного течения жидкого металла по боковым стенкам кратера с передней в хвостовую часть сварочной ванны, которое состоит в следующем: при ЭДС стали 2Х13 с поверхности пластины в ванну были занесены частицы окисной пленки, которые после их захвата потоком расплава позволили выявить направление течения жидкой фазы.

Проведенный анализ режима течения расплава в сварочной ванне показал, что наличие истекающей в окружающее пространство камеры из кратера газопаровой фазы оказывает наибольшее возмущающее воздействие на пленочное течение расплава в виде волн.

При анализе сравнивалось воздействие на сварочную ванну силы тяжести, перетекание расплава из зоны плавления в зону кристаллизации и под действием газопаровой фазы, а оценка производилась по величине числа Рейнольдса.

Ч е т в е р т а я г л а в а содержит практические рекомендации по повышению стабильности формирования сварного шва при ЭЛС. Анализ известных выражений для определения глубины проплавления, большинство из которых определялись из закона сохранения энергии, показал, что глубина проплавления прямо пропорциональна эффективной мощности электронного луча, и эта зависимость не ограничена сверху. Это означает бесконечное возрастание глубины проплавления при соответствующем увеличении эффективной мощности электронного луча.

Однако накопленный к настоящему времени большой экспериментальный материал по электроннолучевой сварке металлов показывает, что после достижения некоторого значения глубины проплавления дальнейшее увеличение эффективной мощности электронного луча уже не приводит к пропорциональному увеличению глубины проплавления. Этот избыточный подвод тепла вызывает только мощное возмущение сварочной ванны, которое воспрепятствует получению качественного формирования сварного шва, и только проплавляет металл. На практике ЭЛС с несквозным проплавлением это возмущение проявляется в интенсивном разбрызгивании и выплеске расплава из ванны, а в случае сквозного проплавления еще и в его вытекании через корень шва.

По нашему мнению, это ограничение максимальной глубины проплавления, обеспечивающей качественное формирование сварного шва при ЭЛС, обусловлено гидродинамикой процесса металлопереноса в ванне.

Исследование условия надежного удержания расплава в зоне кристаллизации сварочной ванны на линеаризованной модели статического приближения в предположении, что фронт кристаллизации покрыт в среднем равномерным слоем жидкого металла толщиной h_k , позволило получить следующее выражение для равновесной толщины слоя расплава h_p :

$$h_p \approx \frac{45\gamma}{\rho g \delta \cos \beta}, \quad (9)$$

где

$$\gamma = \sin \arctg \left| 1 - \frac{\rho_{\text{св}}}{\delta} \right|, \quad (10)$$

ρ - плотность расплава, г/см³; δ - толщина свариваемого металла (при ЭДС со сквозным проплавлением), см; g - ускорение свободного падения, см/с²; β - угол между стенкой кратера (осью пучка) и вертикалью; $\rho_{\text{св}}$ - теплота сублимации свариваемого металла; остальные обозначения определены выше.

Если толщина пленки жидкого металла будет больше своего равновесного значения h_p для данных ρ , β , δ , γ и β , то условие равновесия жидкости будет нарушено. Это приведет к стеканию расплава в виде капель, уменьшению толщины жидкого слоя и общей неустойчивости сварочной ванны.

Таким образом, для создания стабильных условий существования кратера, при которых расплавленный металл не вытекает из ванны, а надежно удерживается силами поверхностного натяжения, процесс электроннолучевой сварки необходимо вести так, чтобы толщина пленки расплава не превышала равновесной величины h_p , т.е.

$$h_k \leq h_p. \quad (11)$$

Теплота, выделяющаяся при последующей кристаллизации перегретого расплава, вызывает дополнительное подплавление основного металла и увеличение толщины пленки жидкой фазы в зоне кристаллизации сварочной ванны. Это положение подтверждается высокоскоростной киносъемкой сварочной ванны.

Решение неравенства (11) с учетом этого факта в реферируемой работе получено в виде следующего выражения для определения максимальной толщины металла $\delta_{\text{макс}}$, свариваемой за один проход при стабильном формировании шва:

$$\delta_{\text{макс}} \approx \frac{1,266 \gamma}{\kappa_1 \rho g \cos \beta} \left[\frac{\left| \frac{\partial \sigma}{\partial T} \right| (T_k - T_n) V_{\text{св}}^2}{3 \alpha^3 / \mu \mp \alpha_n^3} \right]^{1/8}, \quad (12)$$

где $\kappa_1 = \left(\frac{g}{\pi e} \right)^{1/2} \left(\frac{T_k}{T_n} + \frac{H_T}{c \rho T_n} \right)$; e - основание натурального логарифма; T_k и T_n - температура перегретого жидкого металла в сварочной ванне и плавления соответственно, °С; H_T - скрытая теплоты плавления металла, Дж/см³; c - его теплоемкость, Дж/г.град; α - коэффициент температуропроводности сва-

риваемого металла, $\text{см}^2/\text{с}$; d_n - эффективный диаметр электронного пучка, см ; $\xi = L/\delta$ - коэффициент пропорциональности; L - длина сварочной ванны, см .

Анализ зависимости (12) показал, что наиболее рациональным способом достижения наибольшей толщины свариваемого металла на практике является проведение ЭЛС горизонтальным пучком на вертикальной плоскости ($\beta = \pi/2$). При этом улучшаются условия надежного удержания расплава в сварочной ванне, а значит достигается и повышение стабильности формирования сварного шва за счет снятия учитываемых этой моделью ограничений.

Для экспериментальной проверки предлагаемой модели процесса формирования сварного шва в работе использовалась тепловая модель ЭЛС Хашимото и Мацуды. Ее результаты свидетельствуют о корректности рассмотренной модели процесса формирования шва и путей повышения его стабильности.

Используя любую известную тепловую модель процесса электроннолучевой сварки (зависимость для определения параметров шва как функции параметров ЭЛС) и выражение (12), можно построить номограмму для выбора оптимальных параметров ЭЛС, обеспечивающих качественное стабильное формирование шва. В качестве примера на рис. 4 представлена такая номограмма, при расчете которой использовалась тепловая модель Хашимото и Мацуды.

Построенная таким же образом аналогичная номограмма для случая ЭЛС горизонтальным пучком на вертикальной плоскости ($\beta = \pi/2$) показывает, что этот технологический прием дает возможность производить сварку в более широком диапазоне параметров при стабильном формировании шва.

Проведенная в работе качественная сравнительная оценка устойчивости кольцевого двухфазного (пар-расплав) течения в вертикальном и горизонтальном каналах проплавления показала, что в последнем случае гидродинамическая устойчивость сварочной ванны, а следовательно, и стабильность процесса формирования шва выше, чем при вертикальной ориентации пучка и канала.

В п я т о й г л а в е освещено промышленное применение результатов исследований. Производственная необходимость поставила в ряд актуальных задачу замены сталей 12МХ и 10Г2С1 на литейные 20ХМД и 20ХМФЛ. Согласно литературным данным и ис-

следованиям, проведенным на кафедре "Технология металлов" Московского энергетического института, газосодержание в отливках выше, чем в прокате. Практика электроннолучевой сварки свидетельствует, что с повышением газосодержания свариваемого металла понижается стабильность процесса формирования шва. Проведенные нами эксперименты по ЭЛС вертикальным пучком разнородных сталей 12Х13 с 20ХМЛ и 12Х13 с 20ХМФЛ показали, что: стабильность существования сварочной ванны очень низкая (наблюдаются сильное разбрызгивание и выплески расплава из ванны, которые не позволяют получить качественное формирование шва); варьирование режимов ЭЛС не обеспечивает существенного улучшения стабильности и качества формирования шва.

На основании результатов реферируемой работы, которые изложены выше, было решено проводить сварку горизонтальным пучком на вертикальной плоскости. Режимы ЭЛС подбирались из условия получения сквозного проплавления и стабильного формирования сварного шва.

Разработанная технология электроннолучевой сварки разнородных сталей 12Х13 с 20ХМЛ обеспечивает высокую стабильность и хорошее формирование шва. Проведенный комплекс механических испытаний и металлографический анализ показали, что требуемые прочностные свойства сварного соединения обеспечены.

Технология ЭЛС разнородных сталей 12Х13 с 20ХМЛ внедрена на одном предприятии.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Показано, что проведение сварки горизонтальным пучком на вертикальной плоскости при использовании сквозного проплавления снижает гидродинамическое воздействие на сварочную ванну и создает лучшие условия для бездефектного формирования шва.

2. Установлено, что применение ЭЛС горизонтальным пучком на вертикальной плоскости дает возможность производить сварку в более широком диапазоне параметров при стабильном формировании шва. Показано, что имеется возможность повысить производительность примерно в 1,4 раза при сварке сплава АМг6 и в 1,2

рава на сплаве ВТ22 по сравнению со способом сварки вертикальным пучком.

3. Показано, что значение максимальной толщины металла, качественно свариваемой за один проход, ограничено гидродинамикой металлопереноса.

4. Предложен, теоретически и экспериментально обоснован механизм переноса жидкого металла. Впервые доказано, что перенос металла по боковым стенкам кратера происходит за счет действия сил поверхностного натяжения и статического давления продуктов испарения в канале проплавления.

5. Разработана методика определения основных параметров металлопереноса, на основании которой построена номограмма для выбора оптимальных параметров ЭЛС, обеспечивающих повышение стабильности формирования сварного шва и его качества.

6. Разработана технология сварки разнородных сталей 12Х13 с 20ХМЛ, обеспечивающая получение качественного сварного соединения.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Ольшанский Н.А., Шевченко В.А. Перенос металла в процессе электроннолучевой сварки. - "Труды МЭИ. Производство оборудования для тепловых станций", 1975, вып.225, с.15-25.

2. Шевченко В.А., Новодарёжкина Т.В. Изучение переноса металла в процессе электроннолучевой сварки с использованием маркирующих материалов. - "Труды МЭИ. Производство оборудования для тепловых станций", 1975, вып.225, с.25-31.

3. Шевченко В.А. Максимальная толщина пленки жидкого металла, способная удержаться на вертикальной стенке. - "Труды МЭИ. Производство оборудования для тепловых станций", 1975, вып. 225, с. 31-34.

4. Ольшанский Н.А., Шевченко В.А. Анализ условий существования кратера при электроннолучевой сварке (ЭЛС) со сплавом проплавлением и свободным формированием корня шва. - "Труды МЭИ. Материаловедение и энергомашиностроение", 1976, вып. 305, с. 3-18.

5. Ольшанский Н.А., Шевченко В.А. О формировании сварного шва при электроннолучевой сварке (ЭЛС). – Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции "Современные проблемы энергетики и электротехники", М., 1977, с. 124.

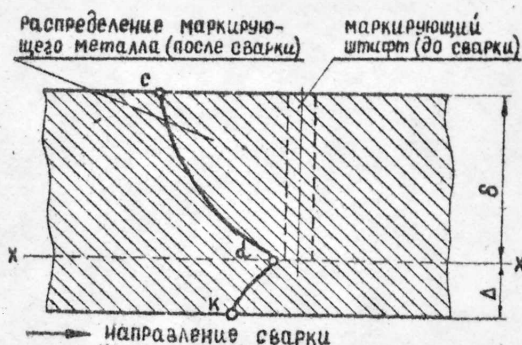


Рис.1. Картина распределения маркирующего материала в продольном осевом сечении шва:

- δ – толщина металлической пластины;
- Δ – величина провисания корня шва;
- $x-x$ – след нижней плоскости пластины;
- cdk – след изотермы кристаллизации сварочной ванны, зафиксированной маркирующим материалом.

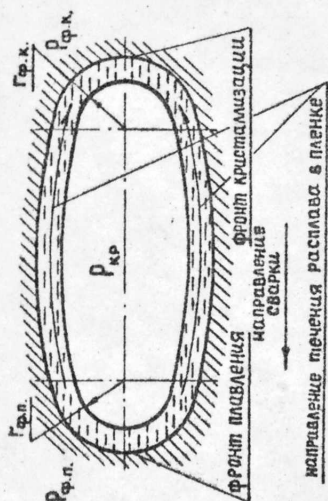


Рис.2. Схема сварочной ванны при ЭДС (поперечное сечение крatera).

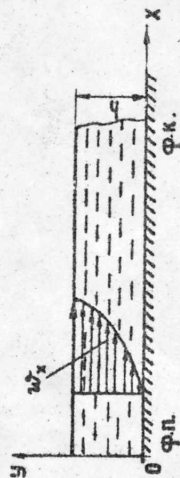


Рис.3. Расчетная схема пленочного течения расплава.

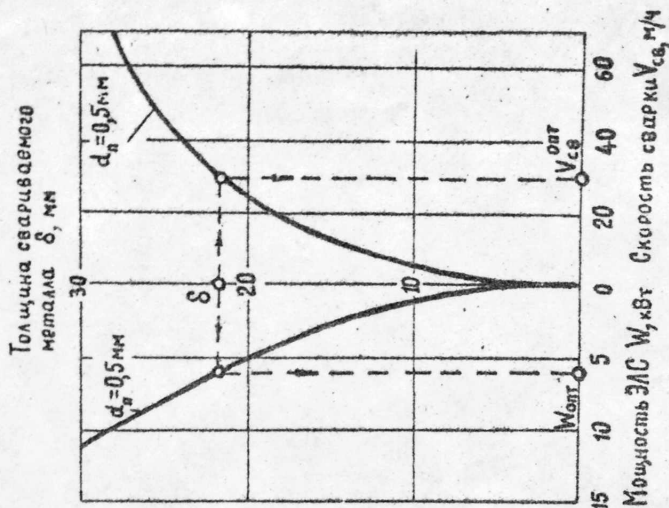


Рис.4. Номограмма для выбора оптимальных параметров ЭДС алюминия: $\beta = 0$, $\xi \approx 2,0$.

БВ 00125. Подписано и печати 23.П.79г.Формат 60x84^I/16.Печ.л.1.
Заказ 1605. Тираж 100. ВГТ. Ротапринт.