

М128043

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Аспирант Л. П. ЕРЕГИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЙ СВАРКИ НА ПРОЦЕССЫ
ТЕПЛОВОЫДЕЛЕНИЯ, ПЛАВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ТЕПЛА

(05.167 — Машины и технология сварочного производства)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Работа выполнена на кафедре «Машины и автоматизированные сварочные процессы» МВТУ им. Н. Э. Баумана и на Новокраматорском машиностроительном заводе им. В. И. Ленина.

Научный руководитель — доктор технических наук, профессор Винокуров В. А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Мазель А. Г.,

кандидат технических наук Рымкевич А. И.

Ведущее предприятие — Институт электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев.

Автореферат разо

Защита диссертации
на заседании ученого

Отзывы присылать
ска, 5, Ученый Совет

С диссертацией м

М128043

1. Состояние вопроса и исследования, проведенные в области режимов электрошлаковой сварки

Параметры режима электрошлаковой сварки определяют ряд важных показателей, а именно - устойчивость ведения процесса, величину и форму провара, химический состав и механические свойства шва и околшовной зоны, термический цикл в околшовной зоне, величину перемещения кромок в процессе сварки, наличие или отсутствие непроваров, трещин и т.д.

В настоящее время связь между параметрами режима электрошлаковой сварки в общем виде не известна. Известны благоприятные сочетания этих параметров, установленные практически. Более или менее систематизированные данные имеются по сварке проволокой и пластинами, в то время как сварка плавящимся мундштуком изучена недостаточно.

По сварке проволочными электродами исследовано прохождение тока через шлаковую ванну, разработан метод определения сопротивления шлаковой ванны, установлена зависимость между величиной сварочного тока, скоростью подачи электродной проволоки, напряжением и глубиной шлаковой ванны. Изучен тепловой баланс процесса электрошлаковой сварки, определено распределение температур в шлаковой ванне и объяснены процессы саморегулирования плавления электрода при сварке.

Исследования в этой области проведены Волшкевичем Г.З., Макарой А.М., Готальским Д.Н., Сушукон-Слюсаренко И.И., Сафониковым А.Н., Еринбергом М.М., Мельбардом С.Н., Кохом Б.Н., Путиным А.И., Перцовским Г.А., Наваровым Г.В. и другими исследователями.

Проведенные исследования в основном правильно отражают влияние режимов на свойства и форму шва. Однако имеется ряд не изученных вопросов, а с некоторыми выводами и рекомендациями нельзя согласиться. Так, экспериментально установленные зависимости между током и скоростью подачи электродной проволоки позволяют определять величину тока при скорости подачи более 150 м/час, тогда как диапазон малых подач часто используется на практике. Эмпирические формулы для определения тока плавящегося мундштука дают значительные отклонения от практических результатов, так как не учитывают условий сварки.

Отсутствуют рекомендации по определению величины провара и

обеспечению равномерного проплавления при сварке плавящимся мунштуком. Нет достаточно обоснованных данных по влиянию параметров режима электрошлаковой сварки на форму металлической ванны и характер кристаллизации.

Проведенные исследования термического цикла электрошлаковой сварки содержат в основном экспериментальные данные. Существующие расчетные схемы определения температурного поля, построенные на основе распространения тепла при движении одного, двух или трех линейных источников тепла в бесконечной пластине, с той или иной степенью приближения описывают термические циклы на некотором расстоянии от шва. На термический цикл вблизи линии сплавления оказывает влияние пространственная форма источника тепла, которая зависит от режимов сварки. В результате исследований тепловых процессов не удалось пока получить закономерной связи между термическим циклом вблизи линии сплавления и режимом сварки.

Деформации, возникающие при электрошлаковой сварке, достигают значительной величины.

Наиболее заметны поперечные деформации, приводящие к изменению зазора, а следовательно и режима сварки. Жесткие связи, в виде скоб, планок, сухарей, устанавливаемые в зазор, могут значительно уменьшить деформации, за исключением местных перемещений металла кромок в зазор от нагрева сварочным источником тепла, которые практически устранить невозможно.

В настоящее время отсутствуют достаточно полные экспериментальные данные, характеризующие местные перемещения при электрошлаковой сварке металла большой толщины и легированных сталей.

2. Задачи исследования и методика проведения экспериментов

На основе анализа имеющегося материала и требований, вытекающих из условий обеспечения качественного сварного соединения, поставлены следующие задачи исследования:

1. Исследовать влияние основных параметров режима электрошлаковой сварки на величину сварочного тока.
2. Исследовать факторы, определяющие тепловые потери в

формирующих устройствах.

3. Провести экспериментальные исследования местного перемещения металла кромок вглубь разделки от нагрева и проверить зависимость местного перемещения от режимов электрошлаковой сварки.

4. Установить факторы, определяющие величину и форму проплавления, изучить их влияние на образование шва и разработать методику расчетного определения величины проплавления.

5. Определить влияние режима электрошлаковой сварки на температурное поле в зоне сварки и разработать методику расчета термического цикла вблизи линии сплавления.

Методика исследования влияния какого либо элемента режима на величину тока построена на соблюдении постоянными прочих параметров режима, включая и тепловые условия сварки.

С учетом этих требований разработанные схемы опытов включали сварку серии специально подготовленных образцов, имеющих ступенчатые зазоры, расщепленные плавящиеся мундштуки, независимую подачу электродов, автономное питание электро-энергией отдельных электродов и др.

Тепловые потери в формирующих устройствах определялись калориметрическим способом при сварке образцов, отличающихся тепловой мощностью сварки, зазорами, расстояниями между электродом и формирующим устройством, применением разных типов формирующих устройств и способов сварки.

Экспериментальные исследования перемещений кромок выполнялись в процессе сварки образцов и некоторых производственных деталей путем измерения расстояний между кернами, нанесенными на поверхности образца, с последующим определением зависимости перемещений от степени запрещения, состава свариваемого металла и условий сварки. Местные перемещения металла кромок вглубь разделки определялись при запрещении в процессе сварки других видов перемещений за счет жесткого закрепления кромок. Экспериментальные значения местных перемещений сопоставляются с вычисленными по методике МВТУ им.Баумана.

Изучение факторов, оказывающих влияние на термический цикл в околошовной зоне, величину и форму проплавления осуществлялось при сварке образцов с толщиной свариваемого металла не менее 400 мм, при которой тепловое воздействие фор-

мирующих устройств незначительно. Длина образца выбиралась из расчета обеспечения квазистационарного процесса сварки. Термопары углублялись в тело образца для уменьшения влияния формирующих устройств. Величина и форма проплавления определялись по шлифам, вырезанным поперек шва, а форма металлической ванны по шлифам, вырезанным вдоль шва.

III. Связь между параметрами режима электрошлаковой сварки и тепловыми характеристиками процесса сварки

С целью расчетного определения мощности сварки, обеспечивающей получение шва с заданными свойствами, была изучена связь между параметрами режима электрошлаковой сварки и тепловыми характеристиками сварки, включающая определение влияния на величину тока скорости подачи электродной проволоки v , напряжения U , зазора δ , расстояния между электродом и кромкой e , температуры плавящихся мундштуков T_r , глубины шлаковой ванны h , сопротивления шлаковой ванны R , скорости сварки v и др.

Указанные зависимости получены при выполнении серии опытов в соответствии с методикой исследования, основным условием которой является определение влияния какого-либо параметра режима при обеспечении постоянными удельной погонной энергии и других параметров режима сварки.

Анализ экспериментальных данных показал, что ширина зазора, глубина шлаковой ванны и расстояние между электродом и кромкой влияния на величину тока практически не оказывают. Увеличение напряжения не приводит к какому либо заметному изменению суммарного тока при сварке плавящимся мундштуком, тогда как средний ток пластины имеет тенденцию к уменьшению. Например, при сварке плавящимся мундштуком площадью поперечного сечения $F = 27,12 \text{ см}^2$ образца толщиной $\delta = 400 \text{ мм}$ со скоростью сварки $v = 0,0156 \text{ см/сек}$ и напряжении $U = 31 \text{ вольт}$ средний ток пластины составил $I_{\text{пл}} = 880 \text{ а}$, а при $U = 38 \text{ вольт}$ средний ток пластины уменьшился до $I_{\text{пл}} = 770 \text{ а}$. Зависимость тока электродов от скорости подачи электродной проволоки в диапазоне скоростей подач от 40 до 300 м/час при сварке про-

волоочными электродами на режиме:

$U = 47$ вольт, " сухом " вылете $l_c = 70$ мм, хорошо описывается уравнением

$$J = \sqrt{\mathcal{D} \cdot V_s} \quad \alpha \quad \text{где } \mathcal{D} = 1250 \frac{\alpha^2 \text{ час}}{\text{м}}$$

Ток электродов при сварке плавящимся мундштуком несколько больше, чем при сварке проволочными электродами, благодаря отсутствию "сухого" вылета. Увеличение напряжения повышает уровень тока электродов.

Попытка вывести зависимость тока пластины плавящегося мундштука от параметров режима на основании опытных данных не дала положительных результатов, поэтому потребовался детальный анализ процессов, происходящих при плавлении пластины мундштука. Скорость плавления пластины в период прохождения через нее тока обычно больше скорости сварки, поэтому процесс плавления неравномерный: за периодом контакта следует пауза. Анализ составляющих мощности, затрачиваемой на плавление пластины, позволяет установить продолжительность времени контакта пластины со шлаком и продолжительность паузы.

Мощность, затрачиваемая на нагрев пластины до температуры плавления, ее расплавление и на теплоотдачу через боковые поверхности пластины в воздух, состоит из усредненной доли мощности, передаваемой пластине и выделяемой током в период контакта, усредненной доли мощности, передаваемой пластине и выделяемой в виде излучения шлаковой ванны в период паузы, тепловой мощности, передаваемой шлаковой ванной за счет теплопередачи в момент контакта пластины со шлаком, и Джоулева тепла, выделяемого в пластине током. Решение уравнения теплового баланса нагрева и расплавления пластины позволило получить формулу среднего тока пластины мундштука

$$J_{\text{пл}} = \frac{UF[\nu c \delta (T_{\text{пл}} - T_r) + \nu \delta S - q'_{\text{r}}]}{\alpha U^2 - q'_{\text{r}} R' + q'_{\text{r}} n R'} \quad (1)$$

$T_{\text{пл}}$ - температура плавления пластины $^{\circ}\text{C}$
 T_r - температура нагрева пластины током $^{\circ}\text{C}$
 S - удельная теплота плавления $\frac{\text{ккал}}{\text{г}}$

- q_z' - удельная мощность радиации шлаковой ванны, передаваемая пластине $\frac{\text{кал}}{\text{см}^2\text{сек}}$;
- $q_{гп}'$ - удельная мощность теплопередачи от шлака к пластине в момент контакта $\frac{\text{кал}}{\text{см}^2\text{сек}}$;
- α - коэффициент, определяющий долю тепловой мощности, выделяющейся в шлаке при прохождении тока и передаваемой пластине;
- R' - сопротивление прохождению тока пластины площадью 1см^2 в момент контакта со шлаковой ванной ом см^2
- v - скорость сварки $\frac{\text{см}}{\text{сек}}$

В зависимости от удельной мощности сварки, изменяющейся в пределах $\frac{q_u}{\delta} = 300+600$ кал/см.сек, обычных для практики, диапазон изменения $q_{гп}'$ составляет от 20 до 40 кал/см²сек, а выражения $-q_z' \cdot R' + q_{гп}' \cdot R'$ - от 8 до 10 кал.ом/сек. Уровень q_z' зависит от температуры поверхности шлаковой ванны $T_{пш}$ и продолжительности паузы между контактами пластины со шлаком.

Экспериментально получено, что при сварке с удельной тепловой мощностью от 300 до 600 кал/см.сек, температура поверхности шлаковой ванны находится в пределах $1350+1550^\circ\text{C}$, а температура шлака в пределах $1600+1900^\circ\text{C}$.

Температура нагрева мундштука током, с учетом излучения через боковые поверхности при установившемся процессе нагрева, составляет $T_{\pi} = 220+230^\circ\text{C}$.

Сопротивление шлаковой ванны R' определено по схеме проводимости среды между двумя цилиндрическими поверхностями в зависимости от удельного сопротивления шлака, размеров и температуры шлаковой ванны.

Сравнения вычисленных по формуле (1) значений тока с фактическими показавали их удовлетворительное совпадение.

Для практического использования, когда не требуется высокая точность, получена упрощенная формула тока пластины путем подстановки численных значений параметров и их усреднения.

$$J = \frac{u \cdot F (2130 v - 3)}{0,02 u^2 + 9} \quad a$$

Анализ результатов измерений тепловых потерь в формирующих устройствах q_n показывает, что величина потерь зависит от мощности, выделяемой током крайнего электрода q_z , удельной по-

гонной энергии сварки, ширины зазора δ_3 и расстояния между крайним электродом и формирующим устройством f . Например сварка с использованием шарнирного ползуна при

$q_3 = 4800 \frac{\text{кал}}{\text{сек}}$, $f = 1,9$ см. и $\delta_3 = 3$ см. вызвала потери

$q_n = 2100 \frac{\text{кал}}{\text{сек}}$, а при $q_3 = 2800 \frac{\text{кал}}{\text{сек}}$ и неизменных других па-

раметрах потери уменьшились до $q_n = 1100 \frac{\text{кал}}{\text{сек}}$.

При формировании плоским ползуном с усилением 10 мм с $f = 2,2$ см и $q_3 = 3200 \frac{\text{кал}}{\text{сек}}$ потери составили $q_n = 1000 \frac{\text{кал}}{\text{сек}}$, а при $f = 1,4$ см потери повысились до $1800 \frac{\text{кал}}{\text{сек}}$.

Тепловая мощность, поглощаемая формирующим устройством в зоне шлаковой ванны, составляет около 45%, в зоне металлической ванны - 38% и на участке ниже металлической ванны - 17%.

1У. Изменение величины сварочного зазора в процессе сварки

Местные перемещения кромок вглубь разделки $2w$, вызванные нагревом металла в процессе сварки, представляют интерес, поскольку они определяют зазор, от которого зависит тепловой режим сварки и качество сварного соединения. При электрошлаковой сварке, наряду с местными перемещениями кромок, возникают другие виды перемещений, величина которых зависит от степени запрещения деформаций.

Местные перемещения $2w$ не могут быть запрещены внешними силами, поэтому с целью определения количественных значений $2w$ и обеспечения заданного режима сварки, исследованы факторы, определяющие именно этот вид деформации.

Местные перемещения $2w$, полученные экспериментально, показали что в начале шва почти у всех сварок $2w$ меньше. Это свидетельствует о том, что металл нагрет еще недостаточно и кроме того имеет свободу перемещения вдоль кромок. По мере удаления источника тепла от начала пластины деформации увеличиваются и на расстоянии 200+300 мм величина их стабилизируется. Анализ результатов измерений показал, что $2w$ зависит от условий сварки. Например, для толщины свариваемого металла 1200 мм местные перемещения металла кромок составили $2w = 8$ мм, а для толщины 400 мм $2w = 6$ мм при равных прочих условиях сварки. Сварка

металла толщиной 400 мм с удельной тепловой мощностью $\frac{q_u}{\delta} = 483 \frac{\text{ккал}}{\text{см} \cdot \text{сек}}$ вызвала местные перемещения металла кромок $2w = 4 \text{ мм}$, а при сварке с $\frac{q_u}{\delta} = 571 \frac{\text{ккал}}{\text{см} \cdot \text{сек}}$ $2w$ составили 6 мм. Существует формула для определения $2w$, выведенная Винокуровым В.А., по которой с целью определения возможности использования её для практических целей были выполнены расчеты местных перемещений кромок по данным режимов опытных сварок. Сопоставления $2w$, полученных аналитически, с фактическими, измеренными при сварке, указали на близость обоих значений.

Это позволило сделать вывод о возможности использования формулы для подсчета местных перемещений. Полученные расчетные зависимости $2w$ от режимов сварки показали, что местные перемещения возрастают при повышении тепловой мощности и уменьшении скорости сварки, а величина их зависит от свариваемого материала.

С увеличением свариваемой толщины металла за счет относительного уменьшения теплоотдачи повышается максимальное сближение кромок, причем влияние толщины металла сказывается больше при сварке тонкого металла.

При сварке металла толщиной свыше 600 мм изменение толщин при постоянной удельной энергии почти не оказывает влияния на сближение кромок (см. табл. № 1).

Ввиду того, что величина местных перемещений металла вглубь разделки в зависимости от условий сварки составляет $2,5 + 10 \text{ мм}$, т.е. до 30% величины вавора, при определении режима сварки эти перемещения необходимо учитывать путем вычитания $2w$ из расчетного вавора.

Таблица № 1

№№ пп	v см/сек	$\frac{q_u \text{ ккал}}{\delta \text{ см} \cdot \text{сек}}$	δ см	$2w$ см	№№ пп	v см/сек	$\frac{q_u \text{ ккал}}{\delta \text{ см} \cdot \text{сек}}$	δ см	$2w$ см
1	0,012	500	30	0,545	8	0,016	800	30	0,592
2	0,016	500	30	0,474	9	0,016	500	12	0,35
3	0,02	500	30	0,399	10	0,016	500	18	0,4175
4	0,026	500	30	0,317	11	0,016	500	42	0,496
5	0,032	500	30	0,26	12	0,016	500	60	0,509
6	0,016	400	30	0,397	13	0,016	500	100	0,515
7	0,016	600	30	0,533	-	-	-	-	-

У. Влияние режимов сварки на форму и глубину проплавления

Для определения величины проплавления проведен анализ тепловых процессов, происходящих в шлаковой и металлической ваннах на границе с твердым металлом, и разработана расчетная схема.

Температура шлака и температура кромок металла, соприкасающегося со шлаковой ванной, увеличиваются по глубине, поэтому с некоторым приближением теплопередача от шлака в основной металл принимается постоянной по высоте ванны.

Другая часть тепла передается в основной металл через поверхность металлической ванны, в которую поступает тепло из перегретых участков ванны и с расплавленным электродным металлом.

В расчетной схеме шлаковый источник тепла, действующий на границе шлаковой ванны и кромки металла мощностью, эквивалентной половине мощности шлаковой ванны $\frac{q_w}{2}$, перемещается со скоростью V по краю полубесконечной пластины и нагревает половину пластины. Источник тепла такой же мощности перемещается также по краю полубесконечной пластины и нагревает другую половину пластины. Источник тепла, эквивалентный мощности металлической ванны q_m , движется со скоростью V в бесконечной пластине и выделяет тепло равномерно по зеркалу металлической ванны. Металл на границе сплавления нагревается источником $\frac{q_w}{2}$ до температуры T_w , а источником q_m до T_m . В сумме указанные температуры дадут температуру плавления металла $T_{пл}$. Таким образом величина провара и ширина участка действия металлического источника тепла q_m определяются решением сформулированной задачи и зависят от режимов сварки.

Используя уравнение распространения тепла от действия подвижного линейного источника в предельном состоянии процесса и суммируя элементарные приращения температур dT_w и dT_m , получим

$$T_{пл} = \frac{q_u}{2\pi\lambda\sigma(c+1)} \left[\frac{c}{b_w} \int_0^{b_w} \left[\frac{\partial y}{\partial a} \right] dy + \frac{1}{h} \int_{-h}^0 \exp\left(-\frac{\partial x}{\partial a}\right) \lambda_0 \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial a}\right)^2} dx \right]$$

$$b_w = b_3 + 2z$$

(31

$b_{ш}$ - ширина шва,
 z - глубина проплавления,
 h - глубина шлаковой ванны,
 b_3 - величина зазора.

Соотношение $C = \frac{q_{ш}}{q_m}$, входящее в уравнение, определено по данным опытных сварок следующим образом $q_m = \sqrt[3]{\delta b_{ш} \gamma T_{мв}}$; а $q_{ш} = q_u - q_m$ при средней температуре жидкой стали по данным Перцовского Г.А. $T_{мв} = 1900^\circ$.

Заменой переменных уравнение (2) выражено в безразмерных величинах, а затем с целью определения глубины проплавления решено на электронно-вычислительной машине Минск-22 с подстановкой параметров режимов в пределах их применения на практике.

$$\frac{\partial b_3}{\partial a} = 0,1 \pm 10; \quad \frac{\partial z}{\partial a} = 0 \pm 10; \quad \frac{\partial h}{\partial a} = 0,1 \pm 1,6$$

По результатам вычислений были построены номограммы и графики, характеризующие связь указанных выше безразмерных параметров, а также график зависимости провара z от безразмерной мощности $\theta = \frac{q_u}{T_{мв} \gamma A \delta}$ и скорости сварки при наиболее часто встречающихся режимах сварки: $h = 5$ см, $b_3 = 3$ см.

Сравнение проваров, вычисленных по данным режимов опытных сварок, с фактическими средними, полученными путем планиметрирования площадей проплавления на шлифах, вырезанных из швов, указывает на удовлетворительную сходимость результатов (табл.2)

Анализ связи между параметрами режима и величиной проплавления показывает, что провар увеличивается с повышением удельной погонной энергии сварки. При постоянной удельной погонной энергии сварки с возрастанием скорости сварки увеличивается провар, а, следовательно, и экономичность процесса. Изменение провара при $\frac{q_u}{\delta} = \text{const}$ наиболее чувствительно к колебаниям скорости сварки в диапазоне малых значений v . Изменение глубины шлаковой ванны по разному влияет на величину провара. При постоянных значениях безразмерного провара $\frac{\partial z}{\partial a} > 0,5$ увеличение глубины шлаковой ванны приводит к уменьшению потребной мощности. Увеличение зазора требует повышения удельной мощности сварки при сохранении неизменными остальных величин.

Для оценки формы металлической ванны принят коэффициент формы металлической ванны $\psi = \frac{b_{ш}}{h_m}$, где $b_{ш}$ и h_m ширина и глубина металлической ванны.

Для того, чтобы установить основной параметр, определяющий

Таблица № 2

Обозна- чение опыта	Удельн. мощность $\frac{q_4}{\sigma}$ кал σ см.сек	Толщина сварив. металла δ см	Завор в зоне шла- ков. ванны δ_3 см	Скорость сварки v см сек	Глубина шлаков. ванны h см	Величина провара фактич. χ' см	Величина провара расчетн. χ см
Образец (5)	767	5	2	0,0325	5	2,03	2,09
"	767	5	2	0,0325	3	2,46	2,21
№ 162	449	42	2,63	0,0156	5	1,00	0,92
"	518	42	2,67	0,0156	5	2,12	2,1
№ 163	571	42	2,55	0,0166	5	2,58	2,51
"	662	42	2,55	0,0166	5	3,70	3,37
№ 164	493	42	2,7	0,0156	5	1,25	1,64
"	602	42	2,59	0,0161	5	2,8	2,83
№ 166	532	14	2,7	0,0144	5	2,48	2,44
№ 170	520	35	3,15	0,0112	5	3,22	3,22
"	448	35	4,31	0,0074	5	3,67	3,57
№ 178	578	16	2,6	0,0168	5	2,67	2,45
"	593	16	2,6	0,0174	9	2,24	2,16

ψ , был поставлен опыт, в котором в процессе сварки за счет независимой подачи электродной проволоки по участкам изменялась скорость подачи электродной проволоки с обеспечением постоянной скорости сварки v .

Другая серия участков швов выполнена с различной скоростью сварки при $v_s = \text{const}$.

По макрошлифам, вырезанным из швов в продольном направлении, были определены по участкам ψ . Сопоставление данных, полученных из опыта, позволило сделать вывод о том, что решающее влияние на форму металлической ванны и на процесс кристаллизации оказывает скорость сварки, а не скорость подачи электродной проволоки. Так например, при $v = 0,017 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$
 $\psi = 0,35$, при $v = 0,022 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ $\psi = 0,4$ и при $v = 0,026 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$
 $\psi = 0,6$.

Для оценки формы проплавления были приняты коэффициенты формы проплавления по площади проплавления $\psi = \frac{F_{ш}}{F_{пр}}$ и по ширине проплавления $\psi' = \frac{b_{min}}{b_{max}}$ где $F_{пр} = v_{max} \cdot d'$, $F_{ш}$ - площадь поперечного сечения шва, b_{max} , b_{min} - максимальная и минимальная ширина проплавления.

Применение двух коэффициентов наиболее полно характеризует форму шва: ψ показывает общую, усредненную картину проплавления, в то время как ψ' указывает на наличие местных сужений провара. Влияние режима сварки на форму проплавления определялось при сварке плавящимся мундштуком путем вырезки из швов поперечных шлифов, измерения и сопоставления $F_{ш}$, b_{min} , b_{max} .. Из полученных зависимостей следует, что повышению ψ и ψ' способствует увеличение мощности сварки, уменьшение расстояния между электродами d , увеличение зазора b_z и толщины пластины мундштука d_m . Установлены минимальные значения удельной погонной энергии, обеспечивающие высокие значения ψ и ψ' . При $d = 180$ мм для $d_m = 20$ мм $\frac{q_u}{v \cdot d} = 34500 \frac{\text{ккал}}{\text{см}^2}$,
 для $d_m = 12,6$ мм $\frac{q_u}{v \cdot d} = 38000 \frac{\text{ккал}}{\text{см}^2}$, для $d_m = 8$ мм $\frac{q_u}{v \cdot d} = 44000 \frac{\text{ккал}}{\text{см}^2}$
 при $d = 127$ мм для $d_m = 8+20$ $\frac{q_u}{v \cdot d} \geq 33000 \frac{\text{ккал}}{\text{см}^2}$

У1. Влияние режимов электрошлаковой сварки на размеры зон термического влияния

Для изучения влияния режима сварки на термический цикл и размеры зон термического влияния был поставлен ряд экспериментов и разработана методика расчета термического цикла в околошовной зоне при электрошлаковой сварке.

Термические циклы записывались в различных точках околошовной зоны вплоть до линии сплавления. Из сопоставления изотерм температурных полей сделан вывод, что общая закономерность в распределении температур совпадает с положениями, установленными в работах Н.Н. Рыкалина. Однако в области высоких температур порядка 1000° и выше необходимо учитывать характер выделения тепла в источнике нагрева.

В расчетной схеме определения термического цикла участков металла, прилегающих ко шву, принята форма эквивалентного источника тепла, используемая для расчета проплавления, как наиболее соответствующая реальному источнику.

Металл в точке А околошовной зоны нагревается теплом шлаковой ванны до температуры $T_{шл}$ и теплом металлической ванны до $T_{ам}$. Температура в точке А от действия обоих источников $T_A = T_{шл} + T_{ам}$. Дальнейший ход рассуждений аналогичен выводу уравнения провара в главе У. В результате математических выкладок получено уравнение для подсчета температурного поля в различных зонах сварного соединения.

Наибольший интерес, в отношении обеспечения свойств сварного соединения, представляет термический цикл в точках непосредственно у линии сплавления, поэтому подставив в полученное уравнение координаты точки, лежащей на линии сплавления и выразив параметры режима через безразмерные величины, получим уравнение термического цикла точек, лежащих на линии сплавления.

$$\frac{T_A T_{шл} \rho^3}{q_u} = \frac{1}{c+1} \left[\frac{c}{\frac{\partial b_{шл}}{\partial a}} \cdot \exp\left(-\frac{\partial x_0}{2a}\right) \int_0^{\frac{\partial b_{шл}}{2a}} K_0 \sqrt{\left(\frac{\partial x_0}{2a}\right)^2 + u^2} du + \right. \\ \left. + \frac{1}{\frac{\partial b}{2a}} \int_{\frac{\partial x_0}{2a}}^{\frac{\partial x_0}{2a} - \frac{\partial b}{2a}} K_0 \sqrt{z^2 + \left(\frac{\partial x_0}{2a}\right)^2} dz \right]$$

при этом

$$\frac{\partial b_{шл}}{2a} = \frac{\partial b_3}{2a} + 2 \frac{\partial l}{2a}$$

(4)

Особенность расчетной схемы заключается в том, что при построении термического цикла по уравнению (4) безразмерный провар $\frac{\partial^2}{2a}$ вкладывается, будучи предварительно вычисленным по методике гл.У в зависимости от удельной мощности $\frac{q_u}{\sigma}$ и других параметров режима сварки. Следовательно $\partial_{ш}$, в которое входит переменный провар ∂ , не является постоянно заданной в расчете величиной, а зависит от режима сварки и определяется в результате выполнения расчета.

Сравнение термических циклов точек, лежащих на линии сплавления полученных из опытов и вычисленных по уравнению (4) указывает на близость расчетных и фактических значений.

Для определения влияния параметров режима сварки на термический цикл в околошовной зоне уравнение решено на ЭВМ.

Безразмерные величины были приняты в пределах установленных при определении провара в гл.У. По результатам вычислений построены графики для $\frac{\partial h}{2a} = 0,1; 0,6; 1,1; 1,6$, позволяющие определять термические циклы в околошовной зоне с учетом режима сварки, а также вычислять продолжительность пребывания t металла околошовной зоны выше температуры T и скорость охлаждения ω при температурах образования закалочных структур.

По графикам и с помощью численных расчетов определено влияние режимов сварки на длительность пребывания t металла, расположенного на линии сплавления выше температуры $T = 1300^\circ$, и скорость охлаждения ω в промежутках температур $900^\circ + 800^\circ$ и $700^\circ + 600^\circ$, имеющих определяющее значение при образовании закалочных структур. Анализ результатов расчета показывает, что глубина шлаковой ванны почти не оказывает влияния на ω и t , хотя имеется тенденция к некоторому снижению обоих значений, по мере возрастания её глубины.

При повышении скорости сварки несколько понижается t и возрастает скорость охлаждения ω . Увеличение глубины проплавления вызывает некоторое понижение скорости охлаждения ω и резкое возрастание t .

Длительность пребывания околошовной зоны t выше 1300° возрастает с увеличением вазора, тогда как скорость охлаждения несколько уменьшается.

Влияние вазора на ω и t усиливается, если одновременно изменяется зависящая от вазора скорость сварки. Еще значительно

влияние вазора на оба параметра при одновременном изменении скорости сварки и величины провара (при $\frac{q^4}{v} = \text{Const}$), как это обычно имеет место на практике.

Оценка влияния провара на ω и t при $v = \text{Const}$, $\rho_s = \text{Const}$, $h = \text{Const}$ производилась при переменной тепловой мощности, обеспечивающей эту глубину проплавления.

Результаты исследований, включающие рекомендации по определению величины и формы проплавления, а также рекомендации по расчету тепловых параметров сварки, вошли в "Инструкцию по определению режимов и технологических параметров электрошлаковой сварки" ННМЗ им. В.И.Ленина, которая используется при назначении режимов электрошлаковой сварки.

Полученные зависимости между термическим циклом в околошовной зоне и условиями электрошлаковой сварки использованы при проведении исследований, предназначенных для выбора оптимальных режимов сварки сталей 25ГС, 20Х2М, 25Х2ГМТ, 20ХНМД и др. с целью исключения значительного ухудшения механических свойств шва и околошовной зоны при электрошлаковой сварке без последующей высокотемпературной обработки.

В В В О Д Ы

1. Разработана специальная методика проведения экспериментов по сварке плавящимся мундштуком, включающаяся в использовании ступенчатого вазора, расщепленных мундштуков, независимой подачи электродов, автономного питания и различной глубины шлаковой ванны.

2. Разработана расчетная схема определения тока пластины мундштука, установлены основные факторы, обуславливающие ток пластины: скорость сварки, напряжение, сопротивление шлаковой ванны, температура нагрева мундштука током, мощность теплового излучения шлаковой ванны. Определены численные значения этих факторов, изучено влияние их на величину тока пластины и получена формула для определения величины среднего тока пластины.

3. Экспериментально получена зависимость тока проволоочных электродов от скорости их подачи в ванну сварки в диапазоне скоростей от 40 до 200 м/час. Зависимость тока электродов от скорости подачи в этом диапазоне удовлетворительно описывается

Уравнением параболы. Тепловая мощность процесса электрошлаковой сварки не оказывает влияния на величину тока проволоочных электродов.

4. Определены экспериментальные значения сближения кромок от нагрева при различных режимах сварки: скорости, удельной тепловой мощности, толщины свариваемого металла. Величина местных перемещений практически составляет от 2,5 до 10 мм. Стабилизация величины максимального сближения кромок достигается на участке 200+300 мм от начала шва. Расчетные максимальные сближения кромок удовлетворительно совпадают с опытными.

5. Разработана расчетная схема определения величины проплавления при электрошлаковой сварке и построены графики для определения провара в зависимости от параметров режимов сварки. Сопоставление расчетной величины провара с проплавлением, полученным экспериментально, дает удовлетворительную сходимость.

6. На основании расчетной методики и экспериментальных данных установлены следующие закономерности:

а) на величину проплавления существенное влияние оказывает пространственная форма источника тепла, обусловленная размерами шлаковой и металлических ванн, которые в свою очередь зависят от параметров процесса сварки;

б) увеличение зазора, при постоянных других параметрах режима сварки, приводит к уменьшению провара;

в) изменение глубины шлаковой ванны по равному влияет на величину проплавления. При значениях безразмерного провара $\frac{\varphi l}{2a} > 0,5$ повышение глубины шлаковой ванны приводит к увеличению провара, а при $\frac{\varphi l}{2a} < 0,5$ - к уменьшению;

г) на изменение провара при постоянной удельной мощности сварки оказывают влияние колебания скорости сварки и тем сильнее, чем меньше скорость сварки;

д) с возрастанием удельной погонной энергии и мощности сварки провар увеличивается.

7. Экспериментально установлено, что коэффициент формы металлической ванны возрастает с уменьшением скорости сварки и практически не зависит от скорости подачи электродной проволоки. Коэффициент формы проплавления при электрошлаковой сварке плавящимся мундштуком увеличивается с уменьшением расстоя-

ния между электродами, с увеличением толщины мундштуков и ширины зазора, а также с повышением тепловой мощности сварки.

8. Разработана расчётная схема и построены в безразмерных параметрах графики термических циклов, позволяющие в зависимости от режима сварки, рассчитывать термические циклы точек околошовной зоны вплоть до линии сплавления, а также определять скорость охлаждения и продолжительность пребывания металла выше заданной температуры.

Минимальное время пребывания околошовной зоны выше заданной температуры T обеспечивается повышением скорости сварки, уменьшением зазора и величины проплавления.

Расчетные термические циклы подтверждаются экспериментальными.

9. Результаты исследования вошли в "Инструкцию по определению режимов и технологических параметров электрошлаковой сварки", которая используется при разработке новых режимов сварки ряда легированных высокопрочных сталей.

Основные результаты работы опубликованы в следующих источниках:

1. Ерегин Л.П., Электрошлаковая сварка больших толщин плавящимся мундштуком. "Передовой научно-технический и производственный опыт" ВНИИТИ, 1959 г.

2. Ерегин Л.П., Расчет величины провара при электрошлаковой сварке. "Сварочное производство" № 7, 1970 г.

3. Ерегин Л.П., Влияние режимов электрошлаковой сварки на термический цикл в околошовной зоне. "Сварочное производство" № 2, 1971 г.

4. Ерегин Л.П., Определение величины тока при электрошлаковой сварке плавящимся мундштуком. "Известия ВУЗов, Машиностроение" № 4, 1971 г.

5. Ерегин Л.П. и др. Способ электрошлаковой сварки (плавящимся мундштуком). Авторское свидетельство № 105103 от 15 января 1957 года по заявке № 2104/454023 от 28 февраля 1956 г.

6. Ерегин Л.П., Малай А.Е., Электрод для электрошлаковой наплавки. Положительное решение по заявке 1128808/25-27 от 11 мая 1970 года.

М В Т У
и. И. С. Баумана
ВНЗ КОТЕЛА

М 128043