

## Prebreakdown phases of a barrier discharge in air

*Yu. V. Yurgelenas*

Prokhorov General Physics Institute of Russian Academy of Science, Moscow, Russia

*M. A. Leeva*

Moscow Auto-Road Institute (State Technical University), Moscow, Russia

*The initial stages of a barrier discharge in a short air gap under atmospheric pressure are investigated by numerical modelling. A highly non-homogeneous electric field caused by residual surface charges on the dielectric surfaces, was taken into account. The results of calculation of a barrier discharge radiation are in agreement with experiments.*

PACS: 52.25.-b

УДК 537.527

## Физические процессы пластинчатого электрода при сварке в узкую щелевую разделку

*В. О. Бушма*

Московский государственный технологический университет "Станкин", Россия

*Рассмотрены физические явления, происходящие в пластинчатом электроде, при сварке в узкую щелевую разделку. Показано, что основным процессом, определяющим нагрев электрода и характер его плавления, является протекание сварочного тока по электроду. Предложены технологические приемы, позволяющие получить качественные сварные соединения при сварке в узкую щелевую разделку.*

PACS: 52.50.-b; 02.90.+p

### Введение

Сварка деталей большой толщины без разделки их кромок является сложной технологической задачей. Существующие технологии электронно-лучевой и электрошлаковой сварки, используемые для этой цели, имеют определенные недостатки [1], а иногда существенно усложняют процесс изготовления изделия. В ряде практических случаев для сварки изделий большой толщины может с успехом использоваться дуговая сварка неподвижным плавящимся электродом (ДС НПЭ) — новый способ сварки плавлением.

Дуговая сварка неподвижным плавящимся электродом — один из самых экономичных и высокопроизводительных способов сварки плавлением изделий большой толщины [2, 3]. Наиболее целесообразно применять ДС НПЭ для выполнения сварных соединений при отсутствии рабочего пространства для размещения сварочного оборудования, в труднодоступных и замкнутых местах,

в помещениях с наличием взрывоопасных или вредных для здоровья обслуживающего персонала сред. Управление процессом сварки легко осуществить дистанционно, что позволяет получать сварные соединения в местах с радиационным загрязнением, минимизировав время пребывания обслуживающего персонала в опасной зоне.

Схема процесса ДС НПЭ представлена на рис. 1. На пластинчатый электрод толщиной  $\delta$  наносится диэлектрическое покрытие толщиной  $\Delta$ . Электрод без зазора помещается между свариваемыми частями изделия толщиной  $H$ . Сверху сборки засыпается сварочный флюс. Электрическая дуга возбуждается выполнением короткого замыкания между металлом электрода и свариваемыми частями изделия в торце сборки. При определенных характеристиках источника питания в открытой неравновесной системе "электрод—электрическая дуга—сварочная ванна" возникает автоколебательный процесс, обеспечивающий самоорганизующееся движение электрической дуги в щеле-

вой разделке с высокой скоростью. Скорость сварки способа при соединении изделий большой толщины сильно зависит от толщины свариваемого материала, и для изделий толщиной 10—50 мм может составлять 1,3—0,7 см/с [4]. При одинаковых мощностях сварки такой скоростью не обладает ни один из известных способов дуговой сварки [1]. Феноменальная скорость способа обусловлена особенностями физических процессов, протекающих в пластинчатом электроде и основном металле при сварке.

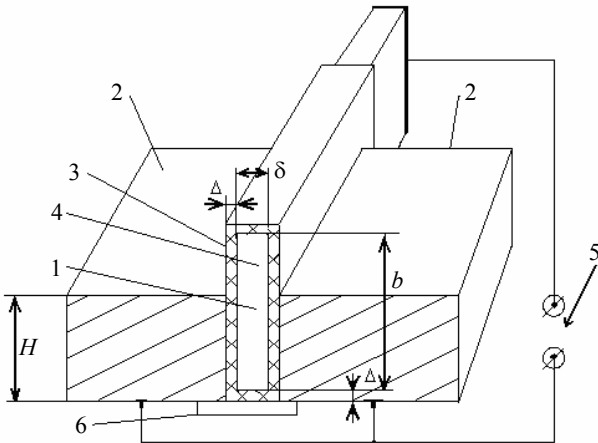


Рис. 1. Сборка свариваемого стыка при ДС НПЭ:

- 1 — пластинчатый электрод; 2 — части изделия; 3 — диэлектрическое покрытие; 4 — торец пластинчатого электрода;
- 5 — место подключения источника питания постоянного или переменного тока; 6 — корневая подкладка

### Физические процессы при ДС НПЭ

Рассмотрим подробнее физические явления, происходящие в пластинчатом электроде при сварке в узкую щелевую разделку.

Данные скоростной киносъемки процесса сварки [4] свидетельствуют, что электрическая дуга в узкой разделке горит не по всей площади торца пластинчатого электрода, а на его части, периодически перемещаясь по всему торцу электрода. В соответствии с экспериментальными данными была решена задача о распределении потенциала электрода [5], представленная на рис. 2.

В тонкую пластину ( $\delta \ll b$ ,  $\delta \ll a$  — толщина электрода значительно меньше его длины и высоты) втекает равномерно по всей торцевой поверхности ток  $I$  (заштрихованная область). Сток тока происходит с другой стороны пластины и занимает площадь меньшую, чем площадь торца пластины (заштрихованная область). На незаштрихованных торцевых поверхностях пластины имеют место нулевые условия Неймана. Если  $\varphi$  — потенциал пластины, уравнение для потенциала пластины имеет вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0.$$

При граничных условиях

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y_{y=0}} = \frac{\partial \varphi}{\partial y_{y=b}} = 0; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial x_{x=a}} = \frac{I p_m}{\delta b};$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_{x=0}} = \begin{cases} \frac{I p_m}{\delta(c-l)}, & l \leq y \leq c \\ 0, & 0 \leq y < l, c < y \leq b \end{cases}$$

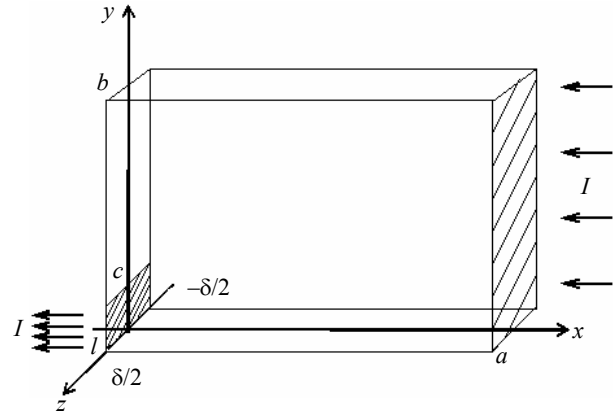


Рис. 2. К определению потенциала пластинчатого электрода

Для потенциала пластины было получено [5]

$$\varphi = \frac{I p_m}{b \delta} x - \frac{2 I p_m b}{(c-l) \delta} \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\sin \frac{\pi k c}{b} - \sin \frac{\pi k l}{b}) \operatorname{ch}[\frac{\pi k}{b}(x-a)] \cos \frac{\pi k y}{b}}{(\pi k)^2 \operatorname{sh} \frac{\pi k a}{b}},$$

где  $c, l$  — координаты узкого стока тока;

$p_m$  — удельное сопротивление материала электрода;

$I$  — электрический ток пластины (ток сварки).

Для проекций плотности тока пластинчатого электрода, используя известные соотношения [6], соответственно можно получить

$$J_x = J_{x0} + \frac{2I}{(c-l)\delta} \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(\sin \frac{\pi k c}{b} - \sin \frac{\pi k l}{b})}{k \pi} \cos \frac{\pi k y}{b} \frac{\operatorname{sh} \frac{\pi k (x-a)}{b}}{\operatorname{sh} \frac{\pi k a}{b}}; \quad (1)$$

$$J_y = -\frac{2I}{(c-l)\delta} \times \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi k c}{b} - \sin \frac{\pi k l}{b}}{k \pi} \sin \frac{\pi k y}{b} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi k (x-a)}{b}}{\operatorname{sh} \frac{\pi k a}{b}}, \quad (2)$$

где  $J_{x0} = -\frac{I}{b\delta}$  — нулевой член разложения, постоянная составляющая плотности сварочного тока.

Если анализировать соотношения (1) и (2), то следует отметить, что при сварке в пластинчатом электроде существуют два внутренних источника нагрева. Равномерно распределенный по электроду источник теплового нагрева обусловлен наличием постоянной составляющей плотности сварочного тока. Неравномерно распределенный источник нагрева электрода определяется неравномерно распределенной плотностью тока электрода вблизи стока тока и описывается рядами Фурье без нулевого члена разложения.

На рис. 3, а—в показано распределение потенциала и объемные распределения координатных плотностей тока на электроде.

Потенциал электрода пластины практически везде распределен равномерно и лишь вблизи стока тока распределение потенциала отличается от равномерного. Плотность тока также распределена равномерно по сечению электрода, но на границе вблизи стока тока ее величина значительно возрастает.

Рассмотрим нагрев электрода протекающим током. Так как плотность тока  $J_x$  содержит свободный член  $J_{x0}$ , который соответствует равномерному распределению тока по сечению электрода, определим нагрев электрода такой плотностью тока.

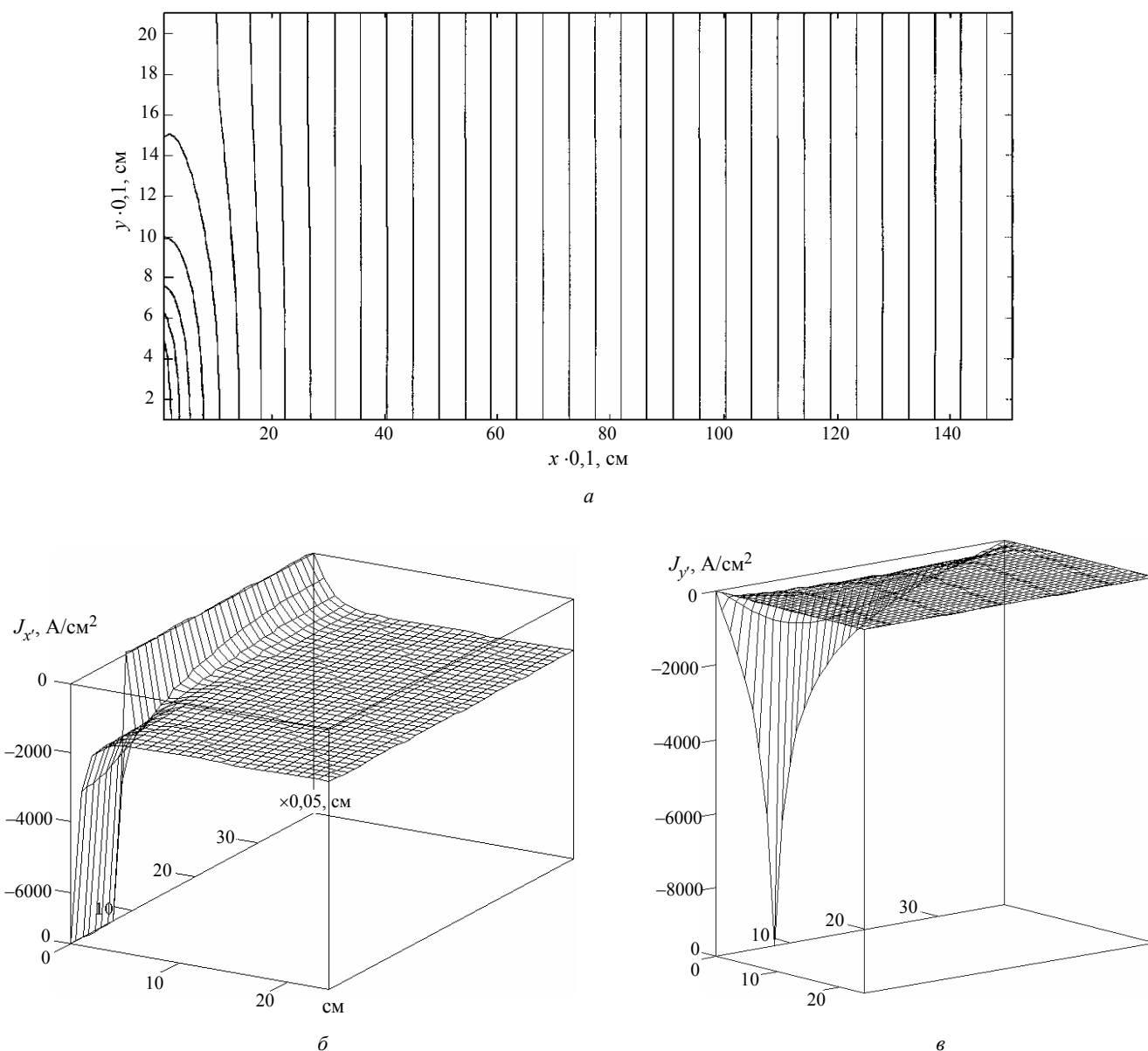


Рис. 3. Распределение потенциала (а), объемной плотности тока  $J_x$  (б), объемной плотности тока  $J_y$  (в) в пластинчатом электроде.

Координаты узкого стока тока:  $c = 0,5 \text{ см}, l = 0$

Уравнение теплопроводности при наличии теплообмена через боковую поверхность электрода и при условии, что теплофизические коэффициенты не зависят от температуры  $T$ , примет вид [7]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_m \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \alpha_m (T - T_0) + \frac{I^2 \rho_m}{S^2 c_m \rho}, \quad (3)$$

где  $c_m \rho$  — удельная объемная теплоемкость;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности;

$\alpha_m$  — коэффициент температуропотдачи пластинчатого электрода;

$S = b\delta$  — площадь поперечного сечения электрода;

$T_0$  — начальная температура электрода.

Для температуры электрода  $T(x, t)$  при нагреве постоянной составляющей плотности сварочного тока получим

$$T(x, t) = T_0 + \frac{I^2 \rho_m}{\alpha_m S^2 c_m \rho} [1 - e^{-\alpha_m t}]. \quad (4)$$

На рис. 4 приведено изменение температуры электрода во времени для уравнения (3), здесь же показаны два нелинейных решения рассматриваемой задачи: при нелинейном электрическом сопротивлении электрода и нелинейной объемной удельной теплоемкости [7].

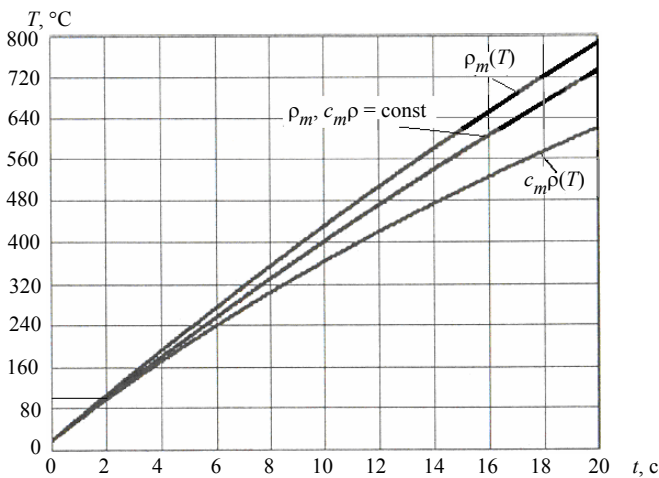


Рис. 4. Изменение температуры электрода во времени при нагреве постоянной составляющей плотности сварочного тока

Следует заметить, что до температур 140—160 °C зависимость удельного сопротивления и удельной объемной теплоемкости электрода от температуры сказывается на изменении температуры электрода мало, и графики практически совпадают.

При нагреве электрода полным сварочным током рассматривалась двухмерная линейная задача теплопроводности при наличии в пластине неравномерно распределенного внутреннего источника тепла [8].

Уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_m \rho} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - \alpha_m (T - T_0) + q_m, \quad (5)$$

где  $q_m$  — удельная мощность внутренних источников теплоты (это объемная мощность внутренних источников теплоты, приходящихся на единичную удельную объемную теплоемкость материала).

Данная величина характеризует скорость изменения температуры материала под действием внутренних объемных источников теплоты.

$$q_m = q_m(x, y) =$$

$$= \frac{Q_m(x, y)}{c_m \rho} = \frac{[J_x^2(x, y) + J_y^2(x, y)] \rho_m}{c_m \rho}, \quad (6)$$

где  $Q_m(x, y)$  — мощность внутренних источников теплоты в единице объема пластины;

$J_x(x, y)$ ,  $J_y(x, y)$  — координатные плотности тока пластинчатого электрода.

В качестве исходных используем нулевые граничные условия второго рода.

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x_{x=0}} = 0, & \quad \frac{\partial T}{\partial x_{x=a}} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial y_{y=0}} = 0, & \quad \frac{\partial T}{\partial y_{y=b}} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Начальное условие} \quad T(x, y, 0) = T_0. \quad (8)$$

Аналитическое и численное решение задачи (5)—(8) приведено в работе [8]. На рис. 5 представлено численное решение задачи, выполненное средой pdeTool известного пакета программ MatLab [9].

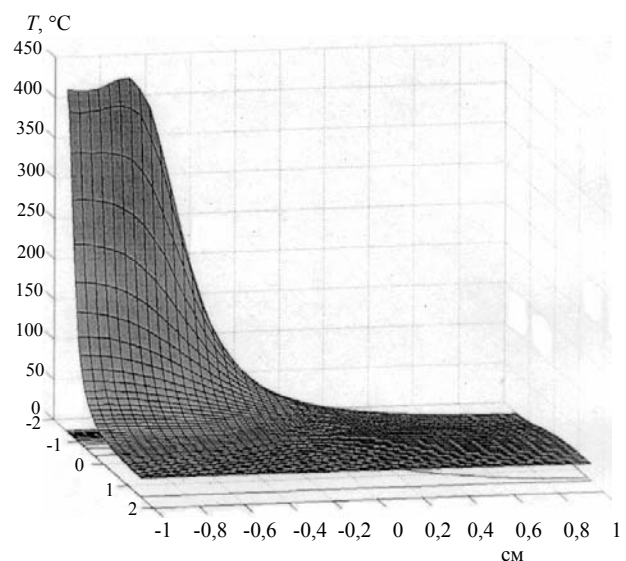


Рис. 5. Численное решение тепловой задачи нагрева электрода протекающим током, выполненное средой pdeTool пакета MatLab. Координаты узкого стока тока:  $c = 0,5$  см,  $l = 0$ ; время нагрева  $t = 0,5$  с

Если сравнить рис. 4 и 5, то можно отметить, что основной нагрев пластинчатого электрода происходит у стока тока и определяется неравномерно распределенной плотностью тока электрода вблизи стока, причем размер области максимального нагрева не превышает толщины электрода  $\delta$ .

Если считать, что область максимального нагрева электрода ограничена объемом  $\delta^3$ , где  $\delta$  — толщина электрода, то можно оценить, как соотносятся между собой мощности равномерно и неравномерно распределенных источников теплоты электрода вблизи стока тока [8].

Средняя мощность равномерно распределенного источника в зоне максимального нагрева  $P_0$  определяется соотношением

$$P_0 = J_{x0}^2 \rho_m \delta^3,$$

где  $J_{x0}$  — постоянная составляющая тока электрода.

Для средней мощности неравномерно распределенного источника в зоне максимального нагрева  $P_{\max}$  имеем

$$P_{\max} = \rho_m \delta^3 \overline{J^2},$$

где  $\overline{J^2} = \frac{1}{\delta^3} \int_0^\delta \int_0^\delta \int_0^\delta [(J_x - J_{x0})^2 + J_y^2] dx dy dz$  — усред-

ненный по выбранному объему  $\delta^3$  квадрат плотности тока пластинчатого электрода без постоянной составляющей плотности сварочного тока.

Для соотношения мощностей неравномерно и равномерно распределенных источников в зоне максимального нагрева получим  $\frac{P_{\max}}{P_0} \approx 28$ .

Таким образом, мощности источников в зоне максимального нагрева различаются более чем на порядок.

Расчет термического КПД по методике, предложенной в [10], показал, что для ДС НПЭ термический КПД  $\eta_t$  составляет 0,5—0,7, что превышает теоретически предельно возможный, рассчитанный для линейного быстро движущегося источника.

Максимальный нагрев пластинчатого электрода протекающим током сварки обеспечивается источником с неравномерно распределенной плотностью мощности по сечению электрода. Этот подогрев вблизи стока тока при сварке может достигать значений, близких к температуре плавления электрода, чем и объясняется феноменальная скорость сварки данного способа, при одной и той же погонной мощности значительно превышающая скорости всех известных видов дуговой сварки.

При решении задачи плавления необходимо определить распределение температуры в нерасплавленной части пластинчатого электрода и ди-

намику изменения фронта плавления электрода во времени [11].

### Перемещение фронта плавления

Рассмотрим задачу о перемещении фронта плавления по пластинчатому электроду. Допустим, что при сварке используется отрицательная полярность [12], т. е. к пластинчатому электроду подключен положительный полюс источника питания (см. рис. 1). Воздействие электрической дуги на пластинчатый электрод сводится к появлению анодного пятна дуги площадью  $(c - l)\delta$  в каком-либо месте фронта плавления электрода, прогреву материала электрода до температуры плавления, затем расплавлению некоторого объема  $\Delta V$  материала электрода, переносу его в сварочную ванну и последовательному переходу анодного пятна дугового нагрева на новое место.

Такие перемещения дуги приводят к тому, что дуга в установившемся режиме осциллирует по торцу электрода с определенной частотой (50—100 Гц). При этом за один проход вверх или вниз на пластинчатом электроде расплавляется слой металла толщиной  $\Delta l$ , который, частично испаряясь, в виде мелких капель переносится через дуговой столб в сварочную ванну.

Так как расплавленный материал электрода переносится дугой в сварочную ванну, то в нашем случае имеет место задача плавления с удалением расплава [11].

Постановка и решение задачи плавления пластинчатого электрода с различным подогревом приведены в работах [11, 13]. После осреднения температурного поля по высоте электрода было получено

$$U(x, t) = \frac{1}{b} \int_0^b T(x, y, t) dy; \quad (9)$$

$$c_m \rho \frac{\partial U}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \bar{Q}_m, \quad t > 0, \quad \xi(x, t) < x < a; \quad (10)$$

$$\bar{Q}_m = \frac{1}{b} \int_0^b J_m^2(x, y, t) \rho_m dy. \quad (11)$$

При  $t = 0: \quad U(x) = T_0, \quad \frac{\partial U}{\partial x_{x=a}} = 0,$

$$\frac{\partial U}{\partial x_{x=0}} = \frac{kIU_{arc}}{S\lambda}, \quad (12)$$

где  $Q_m = J_m^2(x, y, t) \rho_m = [J_x^2(x, y, t) + J_y^2(x, y, t)] \rho_m$  — мощность внутренних источников теплоты в единице объема пластины;

$S = b\delta$  — площадь электрода;

$k$  — коэффициент, учитывающий эффективность вклада общей мощности электри-

ческой дуги в анодную область без затрат на испарение;

$c_m\rho$  — удельная объемная теплоемкость твердой фазы;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности твердой фазы;

$U_{arc}$  — напряжение на дуге.

Для условия Стефана [11, 13] получим:

при  $t > 0$   $\xi = \xi(x, t): U = T_f,$

$$\lambda \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{kIU_{arc}}{S} - \rho L^* V_w, \quad (13)$$

где  $L^*$  — теплота плавления с учетом перегрева расплавленного металла;

$$\xi(x, t) = \frac{1}{b} \int_0^b \tilde{\xi}(x, y, t) dy \quad \text{— осредненное положение}$$

фронта плавления  $\tilde{\xi} = \tilde{\xi}(x, y, t)$  электрода;

$$V_w = \frac{d\xi(x, t)}{dt} \quad \text{— скорость сварки;}$$

$T_f$  — равновесная температура границы раздела фаз.

Предполагается, что фазовый переход происходит в равновесных условиях при постоянной температуре,  $T_f$  — равновесная температура границы раздела фаз. Практически такое условие может быть выполнено при плавлении чистых металлов и эвтектик, так как плавление неэвтектических сплавов происходит в диапазоне температур между солидусом и ликвидусом [14].

Введение среднего положения фронта плавления значительно упрощает математическое описание процесса, сохраняя при этом основные его качественные особенности. После осреднения скорость плавления электрода и скорость сварки — величины совпадающие.

Решение (9)—(13) зависит от степени подогрева пластинчатого электрода протекающим током. В начале сварки подогрев мал, и его можно не учитывать. Решение задачи без подогрева приведено в [11].

В работе [13] приведено решение задачи при подогреве равномерно распределенным по электроду источником теплоты (постоянной составляющей плотности сварочного тока) и общий случай — решение при подогреве электрода полным сварочным током.

На рис. 6 представлены все три решения задачи Стефана для пластинчатого электрода в узкой щелевой разделке. Верхняя пунктирная линия показывает предельную скорость сварки, которая может быть получена на данном материале при выбранной постоянной мощности источника дугового нагрева.

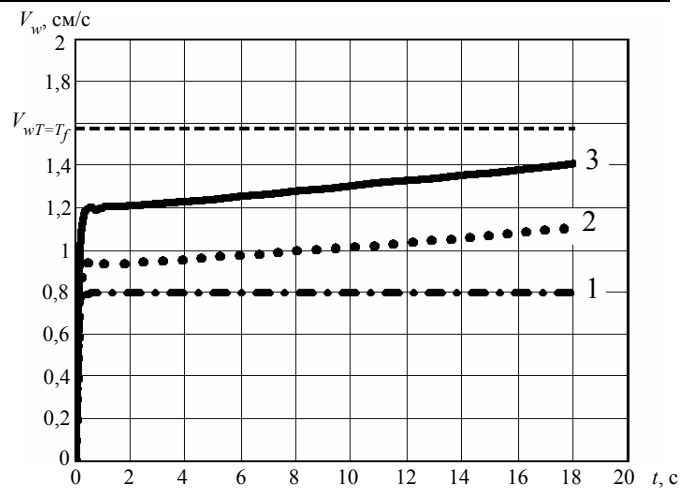


Рис. 6. Изменение скорости сварки при различных режимах плавления:

- 1 — стационарный режим; 2 — подогрев постоянной составляющей плотности сварочного тока; 3 — подогрев электрода полным током сварки

### Обсуждение результатов

Сварные соединения имели бы наилучшее качество, если бы скорость плавления пластинчатого электрода соответствовала кривой 1 (плавление без подогрева, см. рис. 6). В этом случае режим плавления при ДС НПЭ был полностью аналогичен стационарному плавлению электродной проволоки при автоматической сварке под флюсом (АДСФ) [15]. В АДСФ существует подогрев проволоки протекающим током, но стационарность плавления обеспечивается сменой проволоки и правильным выбором скорости ее подачи в правильное пространство.

Как показывают экспериментальные данные, наихудшее качество имели сварные соединения, при выполнении которых скорость плавления пластинчатого электрода соответствовала кривой 3 (см. рис. 6). Более интенсивное нарастание скорости сварки по сравнению с кривой 2 (см. рис. 6) приводит к быстрому наступлению режима плавления, при котором имеет место перегрев расплавляемого металла электрода, переносимого в сварочную ванну. Поэтому при сварке малоуглеродистых сталей наблюдалась значительная пористость сварных соединений, как правило, имеющая место в конце сварного стыка, где перегрев расплавляемого металла электрода максимален.

Существует несколько способов устранения подогрева пластинчатого электрода протекающим током при ДС НПЭ.

Протяженные сварные соединения можно выполнять, заполняя пространство сварного стыка (см. рис. 1) короткими электродами, при плавлении которых режим перегрева расплавляемого металла для каждого электрода не успевает насту-

пить [2]. После оплавления очередного электрода дуга через образовавшуюся в конце между ближайшими электродами общую сварочную ванну переходит к следующему электроду, который не подогрет протекающим током, и т. д. Токоподводы всех электродов соединяют общей шиной с малым удельным сопротивлением.

Другой способ снизить подогрев при сварке — изменить конструкцию протяженного электрода введением дополнительных токоподводов. Как показывают экспериментальные данные, чтобы получить стационарный режим плавления электрода из низкоуглеродистой стали, его подогрев равномерно распределенным по объему источником тепла (постоянной составляющей сварочного тока) не должен превышать температуры 100 °С.

**Методика расчета протяженного пластинчатого электрода при сварке малоуглеродистой стали**

- По рис. 4 для температуры нагрева электрода 100 °С найдем время, когда электрод, высота  $b$  которого приблизительно равна толщине свариваемого изделия  $H$ , будет нагрет до этой температуры ( $t = 2$  с). Допустим скорость сварки  $V_w = 1$  см/с, определяем расстояние между дополнительными токоподводами  $l_t = 2$  см.

- Допустим, что конструктивно удобно расположить дополнительные токоподводы через расстояние  $l_t = 20$  см.

- Для данного расстояния, используя (4), строим зависимость температуры электрода от его высоты (рис. 7) для времени нагрева 20 с, и для 100 °С определяем высоту электрода для выбранного расстояния между токоподводами ( $b_1 \approx 3,5$  см).

- Покрытие наносится на меньшую высоту  $b_t$ , определяемую превышением электрода над изделием.

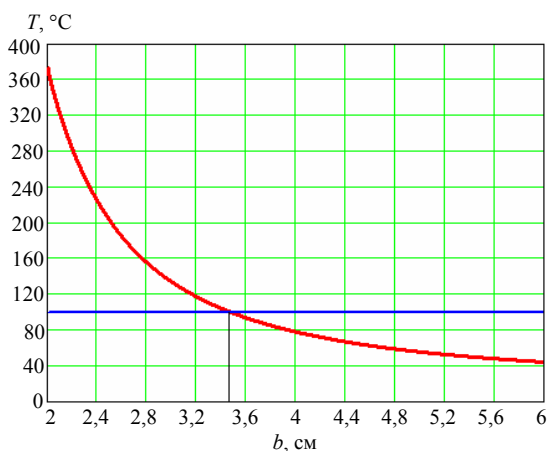


Рис. 7. Зависимость температуры электрода от его высоты для времени нагрева 20 с

Дополнительные токоподводы изготавливаются, как правило, из материала пластинчатого электро-

да и имеют не меньшее, чем основной электрод, сечение. Конструкция электрода выполняется цельной с помощью лазерной резки, или дополнительные токоподводы привариваются к пластинчатому электроду, например аргонодуговой сваркой.

Высота дополнительных токоподводов  $h_t$  определяется из соображений рациональной сборки сварной конструкции для сварки. При этом необходимо учитывать, что равномерное распределение плотности тока в дополнительном токоподводе от места подключения будет обеспечено на расстоянии, равном его ширине  $b_1$ .

Конструкция электрода при сварке протяженных швов показана на рис. 8.

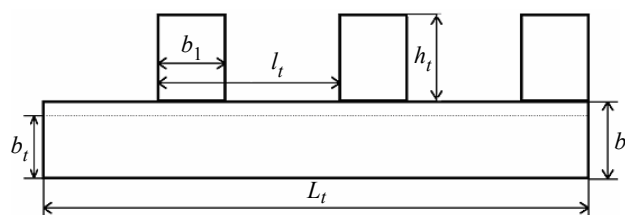


Рис. 8. Конструкция пластинчатого электрода при сварке по горизонтальной схеме протяженных изделий

**Заключение**

- К числу основных физических процессов пластинчатого электрода следует отнести электромагнитные процессы, связанные с протеканием дугового тока через протяженный электрод, которые определяют нагрев электрода сварочным током, изменяют режим его плавления электрической дугой, а также являются основными при создании электромагнитных полей в пространстве дугового столба при сварке.

- Экспериментальные данные свидетельствуют, что при дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом электрическая дуга горит не по всему фронту плавления электрода, а на ограниченных участках, так что имеет место узкий сток тока, значительно изменяющий распределение потенциала и плотности тока электрода.

- Решение задачи Неймана о распределении потенциала пластинчатого электрода при узком стоке тока показывает, что потенциал электрода распределен неравномерно. Наибольшее падение напряжения приходится на участок электрода, находящийся вблизи стока тока на расстоянии, не превышающем высоту электрода.

- При нагреве пластинчатого электрода протекающим током существуют два источника нагрева: с равномерно распределенной удельной мощностью по объему электрода и с неравномерно распределенной удельной мощностью, имеющей максимальное значение вблизи стока тока.

- Зона максимального нагрева электрода расположена вблизи стока тока на расстоянии, не превышающем толщину электрода, и возникает из-за источника с неравномерно распределенной удельной мощностью. В зоне максимального нагрева соотношения мощностей источников равномерного и неравномерного нагрева отличаются более чем на порядок.

- В зоне максимального нагрева осуществляется подогрев электрода до значительных температур. Этим и объясняются необычайно высокая скорость сварки данного способа и феноменальный термический КПД, превышающие при одной и той же погонной мощности все известные виды дуговой сварки.

- Из-за подогрева электрода сварочным током его плавление происходит в нестационарном режиме с постоянно возрастающей скоростью сварки, которая стремится к своему предельному для материала электрода значению, равному отношению осредненной мощности дуги к полной теплоте плавления единицы объема металла электрода.

- Предложены способы устранения чрезмерного подогрева пластинчатого электрода протекающим сварочным током, позволяющие получить качественные сварные соединения при сварке в узкую щелевую разделку.

#### Л и т е р а т у р а

1. Сварка. Резка. Контроль: Справочник. В 2-х томах/Под общ. ред. Н. П. Алешина, Г. Г. Чернышова. — М.: Машиностроение, 2004. Т. 1./Н. П. Алешин, Г. Г. Чернышов, Э. А. Гладков и др. — 624 с.

2. Патент 2069613 Россия, МПК 6 В 23 К 9/173, 9/06. Способ дуговой сварки и источник питания для его осуществления/В. О. Бушма; Опубл. 27.11.96. Вып. 33.

3. Патент 2278771 Россия, МПК 7 В 23 К 9/14. Способ электродуговой сварки неподвижным плавящимся пластинчатым электродом/В. О. Бушма, Д. В. Калашников; Опубл. 27.06.06. Вып. 18.

4. Бушма В. О. Разработка теплофизических основ и оборудования для дуговой сварки неподвижным плавящимся электродом: Дис. ... на соиск. уч. ст. д-ра техн. наук: 05.03.06/РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. — М., 2006. — 442 с.

5. Бушма В. О. Дуговая сварка неподвижным плавящимся электродом//Сварочное производство. 1998. № 9. С. 24—28.

6. Тамм И. Е. Основы теории электричества. — М.: Наука, 1989. — 504 с.

7. Бушма В. О. Нагрев пластинчатого электрода равномерно распределенным источником тепла в дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом//Прикладная физика. 2001. № 2. С. 75—85.

8. Бушма В. О. Нагрев пластинчатого электрода протекающим током в дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом//Там же. 2003. № 2. С. 41—46.

9. Ануфриев Е. И. MATLAB 7 / Е. И. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 1104 с.

10. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых полей при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.

11. Бушма В. О., Кубарев В. Ф., Калашников Д. В. Плавление пластинчатого электрода в дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом (начало процесса)//Прикладная физика. 2005. № 5. С. 62—72.

12. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Г. И. Лесков, О. К. Назаренко, В. В. Подгаецкий и др.; Под ред. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.

13. Бушма В. О., Калашников Д. В. Плавление пластинчатого электрода в дуговой сварке неподвижным плавящимся электродом//Прикладная физика. 2006. № 5. С. 27—33.

14. Гуляев А. П. Металловедение. — М.: Металлургия, 1986. — 646 с.

15. Бринберг И. Л. Автоматическая и полуавтоматическая сварка под флюсом. — М.: Машиностроение, 1960. — 91 с.

Статья поступила в редакцию 24 июля 2008 г.

## Physical processes involved in strip electrode welding using method of slatted splicing

V. O. Bushma

Moscow State Technological University "Stankin", Moscow, Russia

*The author of the article examines physical phenomena involved in strip electrode welding using slatted splicing method. He demonstrates that the heating process of the electrode and its burning-off is mainly determined by the current flow in the electrode. He also offers technological receipts of getting quality welded connections using slatted splicing method.*

PACS: 52.50.-b; 02.90.+p