

РОЗДІЛ III. ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

УДК 621.791.754:51-74

И.В. Пентегов, д-р техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

С.В. Рымар, д-р техн. наук

В.Н. Сидорец, д-р техн. наук

С.Ю. Максимов, д-р техн. наук

И.В. Ляховая, ведущий инженер

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев, Украина

РАСПЛАВЛЕНИЕ ПОКРЫТОГО СВАРОЧНОГО ЭЛЕКТРОДА ПРИ ПОДВОДНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

І.В. Пентегов, д-р техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

С.В. Рymar, д-р техн. наук

В.М. Сидорець, д-р техн. наук

С.Ю. Максимов, д-р техн. наук

І.В. Ляхова, провідний інженер

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

РОЗПЛАВЛЮВАННЯ ПОКРИТОГО ЗВАРЮВАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОДА ПРИ ПІДВОДНОМУ ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

Igor Pentegov, Doctor of Technical Sciences

Chernigov National Technological University, Chernigov, Ukraine

Sergey Rymar, Doctor of Technical Sciences

Vladimir Sidorets, Doctor of Technical Sciences

Sergey Maksimov, Doctor of Technical Sciences

Inna Lyakhovaya, principal engineer

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

MELTING-DOWN OF THE COATED WELDING ELECTRODE AT A UNDERWATER ARC WELDING

Рассмотрено влияние коротких замыканий, в частности, их уровня и длительности, на процесс расплавления покрытого сварочного электрода при подводной дуговой сварке сталей. Учтено влияние давления соленой или пресной воды на глубине, на которой осуществляется сварка, температуры омывающей электрод воды, диаметра электрода и толщины его покрытия, пространственного расположения электрода в процессе сварки, плотности тока в электроде, теплообмена между электродом и омывающей его водой.

Ключевые слова: стали, подводная дуговая сварка сталей, расплавление покрытого сварочного электрода.

Розглянуто вплив коротких замикань, зокрема, їх рівня і тривалості, на процес розплавлення покритого зварювального електрода при підводному дуговому зварюванні сталей. Враховано вплив тиску солоної або прісної води на глибині, на якій здійснюється зварювання, температури води, що омиває електрод, діаметра електрода й товщини його покриття, просторового розташування електрода у процесі зварювання, щільності струму в електроді, теплообміну між електродом і водою, що його омиває.

Ключові слова: сталі, підводне дугове зварювання сталей, розплавлення покритого зварювального електрода.

Influence of short circuits, particularly of their level and duration, on the process of meltdown of a coated welding electrode is studied for underwater arc welding of steels. Allowances were made for effects of salt or fresh water pressure at the depth of welding, temperature of surrounding water, electrode diameter and thickness of its coating, spatial arrangement of electrode during welding process, current density in the electrode, heat exchange between the electrode and surrounding water.

Key words: steels, underwater arc welding of steels, meltdown of a coated welding electrode.

Постановка проблеми. Подводная дуговая сварка сталей широко применяется при строительстве и ремонте морских, речных и береговых инженерных конструкций и сооружений, ремонте корпусов кораблей и судов. Актуальность исследований продиктована необходимостью обеспечения стабильного качества сварных швов при подводной сварке

сталей покрытыми сварочными электродами. Проблемы здесь связаны с интенсивным отводом тепла водой от свариваемых конструкций, что существенно затрудняет формирование качественного сварного шва. Положение усугубляется и тем, что интенсивный отвод тепла осуществляется и с поверхности сварочного электрода, затрудняя его плавление. Статья продолжает начатые авторами работы [1-3] по определению факторов, оказывающих влияние на скорость плавления покрытого сварочного электрода при сварке сталей и их учет при расчете коэффициента расплавления электрода.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследования плавления электрода при сварке сталей освещены во многих работах, наиболее важные из которых отмечены в работах [1-3]. Однако большинство методов расчёта базируются только на экспериментальных данных, что затрудняет процесс исследования.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В опубликованных ранее авторами работах [1-3] не рассматривалась подводная сварка сталей, характеризующаяся интенсивным отводом тепла из зоны сварки и электрода водой.

Целью статьи является дальнейшее развитие аналитических методов расчета коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода, предложенных авторами в работах [1-3], для упрощения анализа процессов, происходящих при подводной дуговой сварке сталей покрытыми сварочными электродами. Здесь необходим учет таких характеристик, как наличие коротких замыканий и их длительность в процессе сварки, величина тока короткого замыкания, пространственное расположение электрода, теплообмен между электродом и омывающей его водой, температура и давление морской или речной воды на глубине, на которой осуществляется сварка.

Изложение основного материала. По существующим требованиям подводная дуговая сварка покрытым электродом должна осуществляться только постоянным (выпрямленным) током. Рассмотрим процессы при естественном охлаждении электрода (без учета течения воды). В статье не будем повторять формулы, которые уже были приведены в работах [1-3], а дадим ссылки на них.

Плавление электрода при подводной дуговой сварке происходит за счет нагрева металла электрода дугой при подогреве электрода протекающим по нему током. При этом металл электрода нагревается от температуры окружающей среды (воды) T_{oc} до температуры капли T_{kap} . Часть расплавленного металла, граничащая с дугой, испаряется. Основной характеристикой плавления электрода является массовая скорость плавления (производительность) G_p , измеряемая массой расплавленного металла электрода в единицу времени (кг/с) [1-3]. Коэффициент расплавления электрода α_p , имеющий размерность кг/(с·А), в первом приближении прямо пропорционален массовой скорости плавления G_p и обратно пропорционален току сварки I_{sv} :

$$\alpha_p = G_p / I_{sv} \quad (1)$$

и сложным образом зависит от времени сварки, характера сварочного тока I_{sv} , температуры капли T_{kap} .

Для определения времени t нагрева электрода проходящим эффективным (действующим) током I_{eff} от температуры окружающей среды T_{oc} до температуры предварительного нагрева электрода T_0 необходимо использовать формулу (9) работы [3], которая записана в виде функции от температуры T_0 , эффективного значения плотности тока в электроде j_{eff} , диаметра электрода d_e и угла наклона электрода φ . В эту формулу входит коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности электрода α_k . Определим этот коэффициент при естественном охлаждении водой. Для этого запишем выражения и аппроксимационные формулы характеристик воды [4; 5] в зависимости от температуры воды $T_{oc} = 273...373 \text{ K}$ ($0...100 \text{ }^\circ\text{C}$).

Температурный коэффициент объемного расширения воды, K^{-1} , равен [4; 5]:

$$\beta_{vd}(T_2) = \begin{cases} \beta_{vd,0} \left(-19,55 + 20,61 \frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right), & \text{if } (T_2 + T_{oc})/2 < 303K; \\ \beta_{vd,0} \left(-8,49 + 9,91 \frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right), & \text{if } (T_2 + T_{oc})/2 \geq 303K, \end{cases} \quad (2)$$

где T_2 – температура поверхности покрытия электрода; $\beta_{vd,0} = 1,82 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ – значение коэффициента объемного расширения воды при температуре $T_{293K} = 293 K$ (при $20^{\circ}C$).

Коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К),

$$\lambda_{vd}(T_2) = \lambda_{vd,0} \left[1,205 - 0,203 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^{-5,007} \right]. \quad (3)$$

Здесь $\lambda_{vd,0} = 0,599$ Вт/(м·К) – значение коэффициента теплопроводности воды при температуре T_{293K} .

Теплоемкость воды, Дж/(кг·К),

$$C_{p,vd}(T_2) = C_{p,vd,0} \left[2,158 - 2,83 \frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} + 2,25 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^2 - 0,5782 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^3 \right], \quad (4)$$

где $C_{p,vd,0} = 4,183 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К) – значение теплоемкости воды при температуре T_{293K} .

Плотность воды, кг/м³,

$$\rho_{vd}(T_2) = \rho_{vd,0} \left[0,0486 + 2,4924 \frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} - 2,074 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^2 + 0,533 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^3 \right]. \quad (5)$$

Здесь $\rho_{vd,0} = 998,23$ кг/м³ – плотность воды при температуре T_{293K} .

Коэффициент вязкости воды, Н·с/м²,

$$\mu_{vd}(T_2) = \mu_{vd,0} \left[5308,25 - 19585,99 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^{\frac{1}{2}} + 27128,97 \frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} - 16714,16 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^{\frac{3}{2}} + 38639,25 \left(\frac{T_2 + T_{oc}}{2T_{293K}} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где $\mu_{vd,0} = 1004$ Н·с/м² – значение коэффициента вязкости воды при температуре T_{293K} .

Коэффициент кинематической вязкости воды $\nu_{vd}(T_2)$, критерий Грасгофа $Gr(T_2)$, характеризующий относительную эффективность подъемной силы, вызывающий свободно-конвективное движение воды вдоль поверхности горизонтально расположенного электрода и критерий Прандтля $Pr(T_2)$, являющийся теплофизической характеристикой теплоносителя (воды), рассчитывается соответственно по формулам (10)–(12) работы [2].

Критерий Нуссельта, определяющий интенсивность теплоотдачи вдоль поверхности горизонтально расположенного электрода, для отдельных областей изменения произведения критериев $Gr(T_2) \cdot Pr(T_2)$, равен [6]:

$$Nu(T_2) = \begin{cases} 1,18(Gr(T_2) \cdot Pr(T_2))^{\frac{1}{8}}, & \text{if } Gr(T_2) \cdot Pr(T_2) \leq 5 \cdot 10^2; \\ 0,54(Gr(T_2) \cdot Pr(T_2))^{\frac{1}{4}}, & \text{if } 5 \cdot 10^2 < Gr(T_2) \cdot Pr(T_2) \leq 2 \cdot 10^7; \\ 0,135(Gr(T_2) \cdot Pr(T_2))^{\frac{1}{3}}, & \text{if } 2 \cdot 10^7 < Gr(T_2) \cdot Pr(T_2). \end{cases} \quad (7)$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности горизонтально расположенного электрода при естественном охлаждении $\alpha_k(T_2)$ определяется по формуле (14) работы [2].

Для вертикально расположенного электрода длиной l , являющейся его характерным линейным размером, критерий Грасгофа вычисляется по формуле (15) работы [2].

Из-за поднимающихся от дуги турбулентных потоков нагретой воды критерий Нуссельта будет определяться по формуле [5]:

$$\text{Nu}(T_2) = 0,135(\text{Gr}(T_2) \cdot \text{Pr}(T_2))^{1/3}, \quad (8)$$

а коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности вертикально расположенного электрода при естественном охлаждении, при учете выражений (12) и (15) работы [2] и формулы (8), будет иметь вид

$$\alpha_k(T_2) = \text{Nu}(T_2) \lambda_{vd}(T_2) / l = 0,135 [g \beta_{vd}(T_2) \mu_{vd}(T_2) C_{p,vd}(T_2) \cdot (T_2 - T_{oc})]^{1/3} \cdot \left(\frac{\lambda_{vd}(T_2)}{\nu_{vd}(T_2)} \right)^{2/3}, \quad (9)$$

не зависящий от длины электрода l , где $g = 9,807 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Аппроксимационная зависимость (8) работы [3] позволяет определить значения коэффициента конвективной теплоотдачи с поверхности α_k для горизонтально (см. формулу (14) работы [2]) и вертикально (см. формулу (9)) расположенного электрода при естественном охлаждении и произвольном расположении электрода в зависимости от температуры поверхности покрытия электрода T_2 , его диаметра d_e и угла наклона φ .

Отметим, что при наличии подводных течений коэффициент α_k будет существенно увеличиваться, причем тем сильнее, чем больше скорость течения воды, и практически не зависит от пространственного расположения электрода.

Коэффициент расплавления электрода α_p при подводной сварке определяется по формуле (19) работы [3]. В эту формулу входит коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности капли $\alpha_{k,кап}$, для расчета которого необходимо определить выражения и аппроксимационные формулы характеристик водяного пара на линии насыщения, образующегося в парогазовом пузыре вокруг ванны расплавленного металла сварного шва, дуги и капли расплавленного металла электрода, полученные на основании работ [4; 5], в зависимости от давления воды p_{vd} на глубине h_{gl} от 0 до 200 м, на которой проводится сварка, где давление p_{vd} изменяется от 1 до 20 атм.

Коэффициент теплопроводности пара, Вт/(м·К),

$$\lambda_p(p_{vd}) = \lambda_{p,0} \left[0,763 + 0,282 \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{1/2} - 4,2 \cdot 10^{-2} \frac{p_{vd}}{p_{1atm}} + 4,6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{3/2} \right]. \quad (10)$$

Здесь $\lambda_{p,0} = 2,372 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м·К)}$ – значение коэффициента теплопроводности пара при давлении 1 атм; p_{1atm} – давление, равное 1 атм.

Теплоемкость пара, Дж/(кг·К),

$$C_{p,p}(p_{vd}) = C_{p,p,0} \left[0,968 + 2,465 \cdot 10^{-4} \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{1/2} + 3,636 \cdot 10^{-2} \frac{p_{vd}}{p_{1atm}} - 1,883 \cdot 10^{-3} \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{3/2} \right], \quad (11)$$

где $C_{p,p,0} = 2,135 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг·К)}$ – значение теплоемкости пара при давлении p_{1atm} .

Плотность пара, кг/м³,

$$\rho_p(p_{vd}) = \rho_{p,0} \left(0,157 + 0,843 \frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right). \quad (12)$$

Здесь $\rho_{p,0} = 0,598 \text{ кг/м}^3$ – плотность пара при давлении p_{1atm} .

Коэффициент вязкости пара, Н·с/м²,

$$\mu_p(p_{vd}) = \mu_{p,0} \cdot 10^{-2} \left[66,3 + 51,4 \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{\frac{1}{2}} - 22,3 \frac{p_{vd}}{p_{1atm}} + 5,27 \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{\frac{3}{2}} - 0,4616 \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^2 \right], \quad (13)$$

где $\mu_{p,0} = 1,197 \cdot 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ – значение коэффициента вязкости пара при давлении p_{1atm} .

Температура пара, K ,

$$T_p(p_{vd}) = T_{p,0} \left[0,836 + 0,195 \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{\frac{1}{2}} - 0,032 \frac{p_{vd}}{p_{1atm}} + 2,647 \cdot 10^{-3} \left(\frac{p_{vd}}{p_{1atm}} \right)^{\frac{3}{2}} \right], \quad (14)$$

где $T_{p,0} = 373 \text{ K} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – значение температуры пара при давлении p_{1atm} .

Температурный коэффициент объемного расширения пара, K^{-1} [4; 5], согласно закону Гей-Люссака

$$\beta_p(p_{vd}) = 1/T_p(p_{vd}). \quad (15)$$

Коэффициент кинематической вязкости пара, $\text{м}^2/\text{с}$,

$$\nu_p(p_{vd}) = \mu_p(p_{vd})/\rho_p(p_{vd}). \quad (16)$$

Критерий Грасгофа, характеризующий относительную эффективность подъемной силы, вызывающий свободно-конвективное движение пара вдоль поверхности капли с характерным линейным размером капли, равным ее среднему диаметру $d_{kap} = 2d_e$:

$$\text{Gr}(p_{vd}, T_{kap}) = \beta_p(p_{vd}) \frac{g d_{kap}^3}{\nu_p^2(p_{vd})} (T_{kap} - T_p(p_{vd})). \quad (17)$$

Критерий Прандтля, являющийся теплофизической характеристикой теплоносителя (пара):

$$\text{Pr}(p_{vd}) = \mu_p(p_{vd}) C_{p,v}(p_{vd}) / \lambda_v(p_{vd}). \quad (18)$$

Критерий Нуссельта будет определяться по формуле [5]:

$$\text{Nu}(p_{vd}, T_{kap}) = 0,135 (\text{Gr}(p_{vd}, T_{kap}) \cdot \text{Pr}(p_{vd}))^{1/3}, \quad (19)$$

а коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности капли при естественном охлаждении будет иметь вид

$$\begin{aligned} \alpha_{k,kap}(p_{vd}, T_{kap}) &= \text{Nu}(p_{vd}, T_{kap}) \lambda_{vd}(p_{vd}) / d_{kap} = \\ &= 0,135 [g \beta_p(p_{vd}) \mu_p(p_{vd}) C_{p,p}(p_{vd}) \cdot (T_{kap} - T_p(p_{vd}))]^{1/3} \cdot \left(\frac{\lambda_p(p_{vd})}{\nu_p(p_{vd})} \right)^{2/3}, \end{aligned} \quad (20)$$

не зависящий от диаметра капли d_{kap} .

Давление воды на глубине, Па , определяется по формуле [7]:

$$p_{vd}(h_{gl}, \rho_{vd}) = p_{1atm} + \rho_{vd} g \cdot h_{gl}. \quad (21)$$

Здесь $p_{1atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$; ρ_{vd} – плотность воды: для пресной воды $\rho_{vd} \approx 999 \text{ кг}/\text{м}^3$; для морской воды $\rho_{vd} \approx 1025 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Определим значения коэффициента расплавления α_p из выражения (19) работы [3]. На рис. 1 построены зависимости от времени нагрева электрода (времени осуществления сварочного процесса) t_{sv} постоянным (выпрямленным) током без коротких замыканий, $k_{t,kz} = 0$, при плотностях тока в электроде $j = 15$ и $20 \text{ А}/\text{мм}^2$ (токи $I = 190$ и 250 А), диаметре электрода $d_e = 4 \text{ мм}$, температуре капли $T_{kap} = 2600, 2800$ и 3000 К – соответственно штрих-пунктирные, пунктирные и сплошные линии, при коэффициенте кратности тока короткого замыкания $k_{kz} = 1,6$ [3], температуре морской воды $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, глубине 50 м , давлении воды $5,96 \text{ атм}$ и угле наклона электрода $\varphi = 45^{\circ}$. Обычно значения коэффициента k_{kz} , равного отношению тока короткого замыкания к сварочному току, в источниках питания для дуговой сварки покрытыми электродами лежат в диапазоне $1,2 \dots 2,5$.

Диапазон изменения коэффициента $k_{t,kz}$, учитывающего долю времени коротких замыканий за период сварки, равен $0 \dots 0,2$ [3]. Из рис. 1 видно, что значения коэффициента α_p с течением времени нагрева электрода постепенно увеличиваются. При больших значениях плотности тока кривые значений коэффициента α_p лежат выше, чем при их меньших значениях, так же как и при меньшей температуре капли расплавленного металла $T_{кар}$, по сравнению с большей температурой.

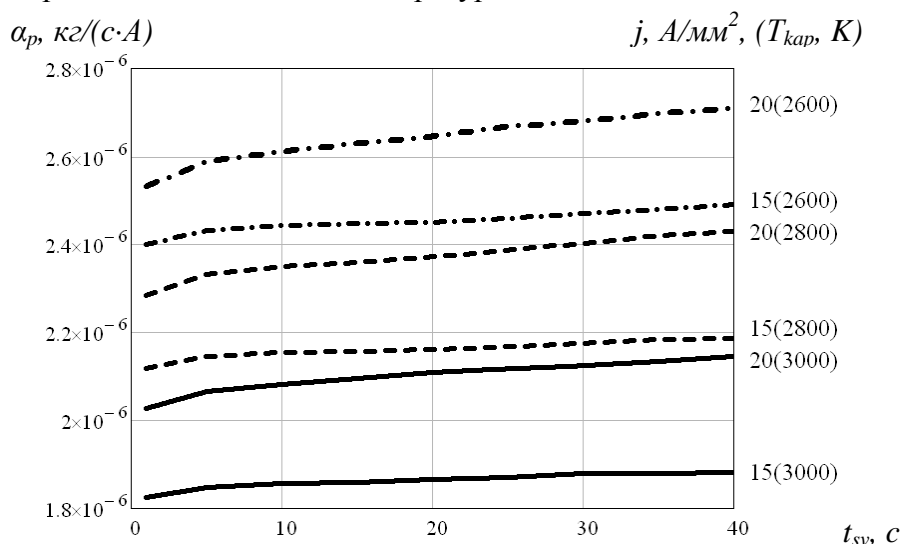


Рис. 1. Зависимости коэффициента расплавления α_p от времени сварки t_{sv} постоянным током без коротких замыканий, $k_{t,kz} = 0$, при плотностях тока в электроде $j = 15$ и 20 А/мм², диаметре электрода $d_e = 4$ мм, температуре капли $T_{кар} = 2600$ К (штрих-пунктирные линии), 2800 К (пунктирные линии) и 3000 К (сплошные линии), при $k_{kz} = 1,6$, температуре морской воды 5 °С, глубине 50 м, давлении воды $5,96$ атм

Наличие или отсутствие коротких замыканий при подводной сварке покрытыми электродами определяется многими условиями: сварочным током, напряжением, величиной дугового промежутка, температурой капли, составом и толщиной покрытия электрода и др. На рис. 2 приведены осциллограммы сварочного тока при подводной сварке на обратной полярности сертифицированным покрытым электродом диаметром $d_e = 4$ мм, разработанным в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, на глубине $0,2$ м, давлении пресной воды $1,02$ атм, температуре воды 15 °С, при токе: *a* – 190 А с короткими замыканиями, $k_{t,kz} = 0,25$, *б* – 250 А без коротких замыканий, $k_{t,kz} = 0$; приведены образцы сварных швов *в* при токе: 190 А – верхний шов, 250 А – нижний шов. На рис. 3 приведены осциллограммы сварочного тока и сварочные швы при подводной сварке на обратной полярности при тех же условиях опытным покрытым электродом диаметром $d_e = 4$ мм, разработанным в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, практически без коротких замыканий. Видно, что при меньшем сварочном токе и наличии коротких замыканий верхний шов на рис. 2, *в* тоньше нижнего шва, полученного при большем сварочном токе и отсутствии коротких замыканий, а металл шва в верхнем шве «стянут» к средней части шва, образуя ребро, несколько сильнее, чем в нижнем шве. Это говорит о лучшем прогреве металла в зоне сварки в нижнем шве, имеющем лучшее качество, по сравнению с верхним швом. На рис. 3, *в* эти отличия в форме швов выражены незначительно, поскольку при формировании верхнего шва практически не было коротких замыканий, и несмотря на то, что швы были получены при разных токах, их форма практически одинакова, что связано с составом покрытия сварочного электрода.

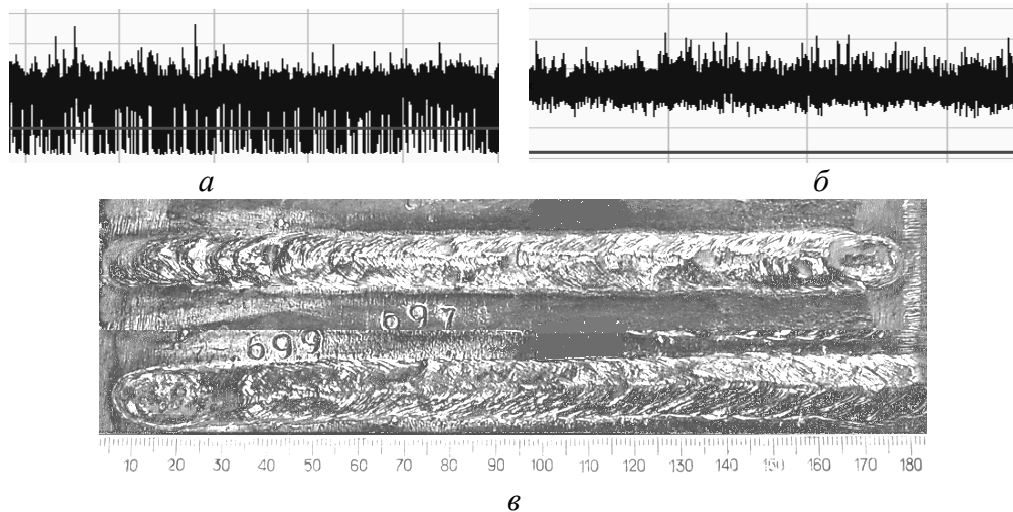


Рис. 2. Осциллограммы сварочного тока при подводной сварке на обратной полярности сертифицированным покрытым электродом диаметром $d_e = 4$ мм, разработанным в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, на глубине 0,2 м, давлении пресной воды 1,02 атм, температуре воды 15°C , при токе: а – 190 А с короткими замыканиями, $k_{t,kz} = 0,25$, б – 250 А без коротких замыканий, $k_{t,kz} = 0$; в – образцы сварных швов при токе: 190 А – верхний шов, 250 А – нижний шов

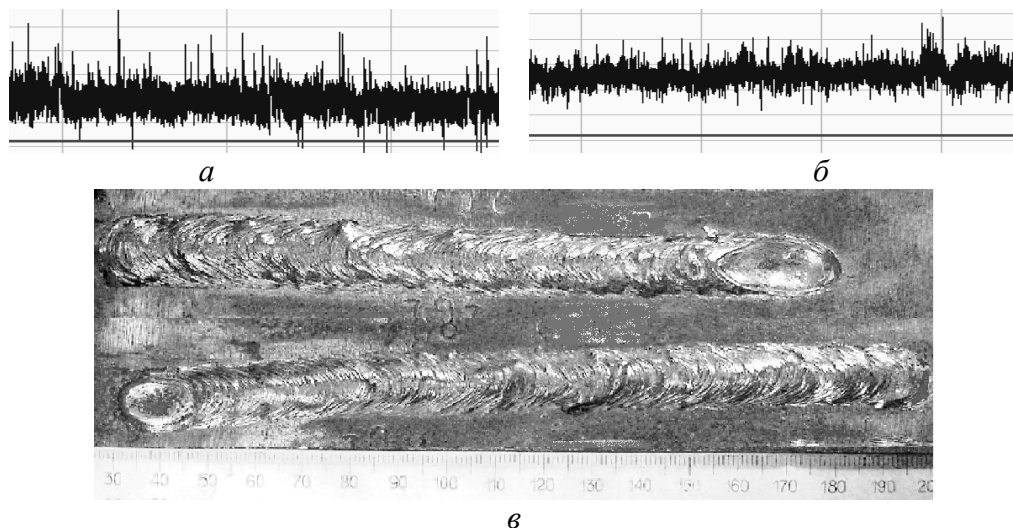


Рис. 3. Осциллограммы сварочного тока при подводной сварке на обратной полярности опытным покрытым электродом диаметром $d_e = 4$ мм, разработанным в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, на глубине 0,2 м, давлении пресной воды 1,02 атм, температуре воды 15°C , при токе: а – 190 А с незначительным количеством коротких замыканий, $k_{t,kz} = 0,005$, б – 250 А без коротких замыканий, $k_{t,kz} = 0$; в – образцы сварных швов при токе: 190 А – верхний шов, 250 А – нижний шов

Как было показано в работе [3], на расплавление электрода влияют два основных фактора. Первый фактор – это нагрев капли электрической дугой, увеличивающийся при отсутствии коротких замыканий и уменьшающийся при их наличии, второй фактор – нагрев электрода проходящим током, увеличивающийся при наличии коротких замыканий, и уменьшающийся при их отсутствии. Рассмотрим подробнее эти два случая. Для наглядности, возьмем более широкие диапазоны изменения значений коэффициентов $k_{t,kz}$ и k_{kz} .

На рис. 4 приведены зависимости коэффициента расплавления электрода α_p от времени сварки t_{sv} при значениях коэффициента, учитывающего долю времени короткого замыкания $k_{t,kz} = 0,2$ и $0,3$, при значениях коэффициента кратности тока короткого замыкания $k_{kz} = 1,0$ (сплошные линии), $1,6$ (пунктирные линии), $3,2$ (штрих-пунктирные линии), диаметре электрода $d_e = 4$ мм, при плотности тока в электроде $j = 20 \text{ А/мм}^2$ и

температуре капли $T_{кап} = 2800 \text{ К}$, температуре морской воды $5 \text{ }^{\circ}\text{С}$, глубине 50 м, давлении воды 5,96 атм и угле наклона электрода $\varphi = 45^{\circ}$.

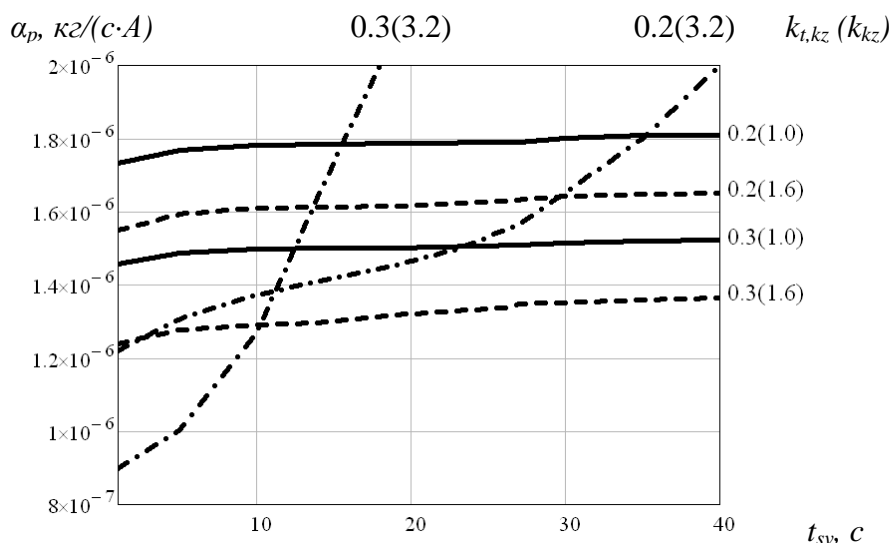


Рис. 4. Зависимости коэффициента расплавления α_p от времени сварки t_{sv} постоянным током с короткими замыканиями – $k_{t,kz} = 0,2$ и $0,3$ при: $k_{kz} = 1,0$ (сплошные линии), $k_{kz} = 1,6$ (пунктирные линии), $k_{kz} = 3,2$ (штрих-пунктирные линии), диаметре электрода $d_e = 4 \text{ мм}$, при плотности тока в электроде $j = 20 \text{ А/мм}^2$ и температуре капли $T_{кап} = 2800 \text{ К}$, температуре морской воды $5 \text{ }^{\circ}\text{С}$, глубине 50 м, давлении воды 5,96 атм

На рис. 4 при значениях коэффициента $k_{kz} = 1,0$ (сплошные линии) и $1,6$ (пунктирные линии), коэффициент α_p больше в случае $k_{t,kz} = 0,2$, по сравнению со значениями при $k_{t,kz} = 0,3$. Так же значения α_p больше при $k_{kz} = 1,0$ по сравнению со значениями при $k_{kz} = 1,6$, поскольку при отсутствии коротких замыканий сварочный процесс непрерывен и происходит постоянный нагрев капли электрической дугой, несмотря на то, что при наличии коротких замыканий возникает более интенсивный нагрев самого электрода. Здесь нагрев капли дугой, то есть первый фактор, является определяющим. При $k_{kz} = 3,2$ (штрих-пунктирные линии) коэффициент α_p сначала больше при $k_{t,kz} = 0,2$, по сравнению со значениями при $k_{t,kz} = 0,3$, и на этом интервале определяющим так же является первый фактор. После 10 секунд сварки значения коэффициента α_p становятся больше при коэффициенте $k_{t,kz} = 0,3$, по сравнению со значениями при коэффициенте $k_{t,kz} = 0,2$, и здесь уже определяющим становится второй фактор, когда нагрев электрода проходящим током интенсивно увеличивается при более длительных коротких замыканиях.

Смена влияния двух факторов хорошо видна на рис. 5, на котором приведены зависимости коэффициента расплавления α_p от значений коэффициента кратности тока короткого замыкания $k_{kz} = 1 \dots 5$ при сварке без коротких замыканий $k_{t,kz} = 0$ (сплошная линия) и с короткими замыканиями при $k_{t,kz} = 0,1$ (пунктирная линия), $k_{t,kz} = 0,2$ (штрих-пунктирная линия), $k_{t,kz} = 0,3$ (точечная линия) в момент времени сварки $t_{sv} = 15 \text{ с}$, диаметре электрода $d_e = 4 \text{ мм}$, при плотности тока в электроде $j = 20 \text{ А/мм}^2$ и температуре капли $T_{кап} = 2800 \text{ К}$, температуре морской воды $5 \text{ }^{\circ}\text{С}$, глубине 50 м, давлении воды 5,96 атм и угле наклона электрода $\varphi = 45^{\circ}$. При сварке без коротких замыканий значения коэффициента α_p не зависят от величины k_{kz} . При сварке с короткими замыканиями значение коэффициента α_p с ростом k_{kz} уменьшается в области малых k_{kz} , а затем начинает резко возрастать, проходя минимум. Этот минимум при $k_{t,kz} = 0,1$ (пунктирная линия) наступает при $k_{kz} \approx 4,0$, при $k_{t,kz} = 0,2$ (штрих-пунктирная линия) наступает при $k_{kz} \approx 3,0$, а при $k_{t,kz} = 0,3$ (точечная линия) минимум наступает при $k_{kz} \approx 2,6$. До минимумов определяющим является первый фактор, после минимумов – второй фактор.

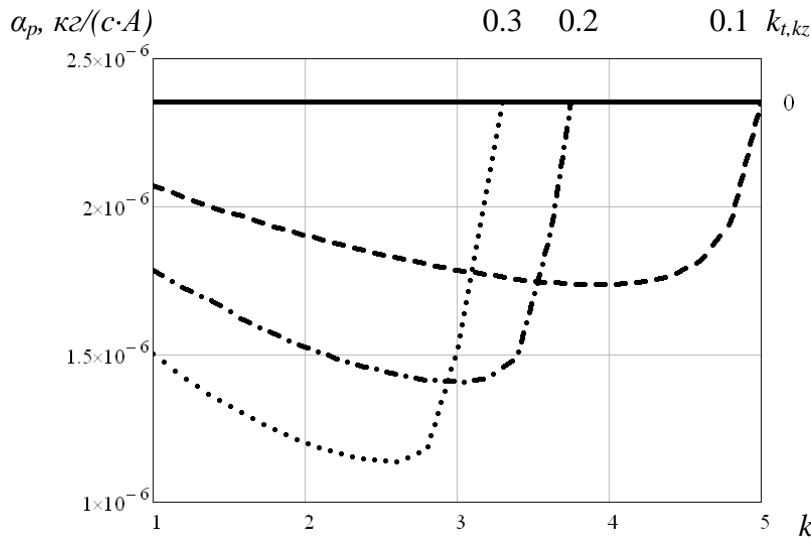


Рис. 5. Зависимости коэффициента расплавления α_p от коэффициента $k_{kz} = 1 \dots 5$ при сварке постоянным током без коротких замыканий $k_{t,kz} = 0$ (сплошная линия) и с короткими замыканиями $k_{t,kz} = 0,1$ (пунктирная линия), $k_{t,kz} = 0,2$ (штрих-пунктирная линия), $k_{t,kz} = 0,3$ (точечная линия) в момент времени сварки $t_{sv} = 5$ с, диаметре электрода $d_e = 4$ мм, при плотности тока в электроде $j = 20$ А/мм² и температуре капли $T_{kap} = 2800$ К, температуре морской воды 5°C , глубине 50 м, давлении воды 5,96 атм

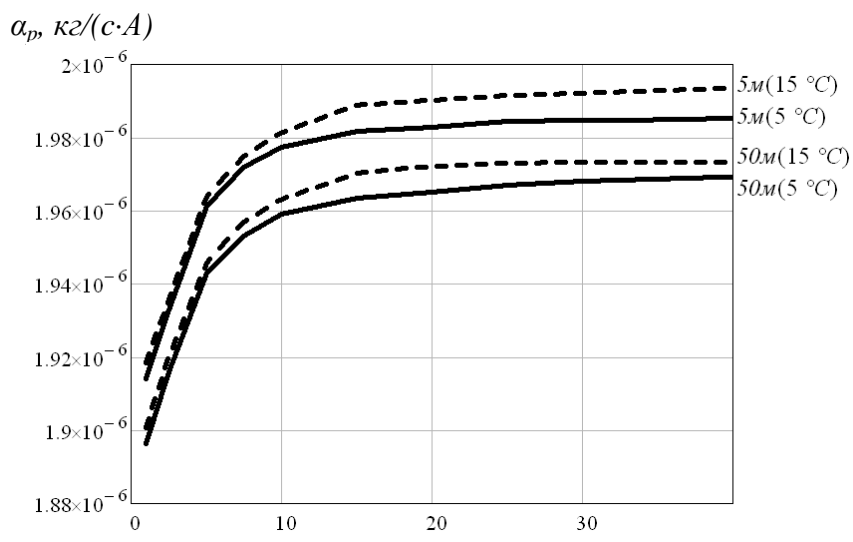


Рис. 6. Зависимости коэффициента расплавления α_p от времени сварки t_{sv} постоянным током с короткими замыканиями, $k_{t,kz} = 0,1$, $k_{kz} = 1,6$, при плотности тока в электроде $j = 20$ А/мм², диаметре электрода $d_e = 4$ мм, температуре капли $T_{kap} = 2800$ К, температуре морской воды 5°C (сплошные линии) и 15°C (пунктирные линии), глубине 5 и 50 м, соответственно давлению воды 1,496 и 5,96 атм

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента расплавления α_p от времени сварки t_{sv} постоянным током с короткими замыканиями, при $k_{t,kz} = 0,1$ и $k_{kz} = 1,6$, плотности тока в электроде $j = 20$ А/мм², диаметре электрода $d_e = 4$ мм, температуре капли $T_{kap} = 2800$ К, температуре морской воды 5°C (сплошные линии) и 15°C (пунктирные линии), при глубине 5 и 50 м, соответственно при давлении воды 1,496 и 5,96 атм, угле наклона электрода $\varphi = 45^\circ$. Видно, что при большей температуре воды и меньшей глубине (меньшем давлении на парогазовый пузырь) значения коэффициента α_p больше.

По сравнению с дуговой сваркой покрытыми электродами в воздушной среде, где с течением времени сварки коэффициент расплавления электрода α_p может резко возрастать от значений $1 \cdot 10^{-6}$ до $9 \cdot 10^{-6}$ кг/(с·А) [2; 3], в зависимости от режима сварки, при подводной сварке расплавление электрода затруднено, из-за интенсивного отвода от него тепла водой и коэффициент α_p изменяется в небольших пределах: от $1,2 \cdot 10^{-6}$ до

$2,8 \cdot 10^{-6}$ кг/(с·А). Это видно по почти горизонтальному расположению кривых значений коэффициента расплавления электрода α_p от времени сварки t_{sv} на длительном интервале времени, см. рис. 1 и 6, при штатных режимах сварки (низких значениях коэффициента кратности тока короткого замыкания k_{kz} , и коэффициента, учитывающего долю времени коротких замыканий за период сварки $k_{t,kz}$). В парогазовом пузыре помимо водяного пара, образуемого тепловой энергией столба дуги, присутствуют пары элементов покрытия и пары металла электрода. За счет более интенсивного (в 1,5...2,0 раза) испарения металла электрода при подводной сварке, по сравнению со сваркой в воздушной среде, а также благодаря снижению температуры электрода уменьшается количество расплавленного металла, который попадает в сварочную ванну шва, что приводит к существенным отличиям в режимах сварки под водой и на воздухе. Поэтому, для улучшения качества сварного шва, подводную сварку ведут при большей вкладываемой мощности за счет увеличения сварочного тока в 1,1...1,2 раза [8]. Эта рекомендация справедлива для малых глубин погружения – 1...2 м. При больших глубинах для сохранения избыточного давления дуги и, следовательно, глубины проплавления основного металла ток надо увеличивать в 2...3 раза, что делает невозможным сохранение подобия между процессами при сварке на воздухе и под водой. При подводной сварке на больших глубинах высокое давление воды уменьшает размеры парогазового пузыря. При этом вода значительно раньше вступает в контакт с жидкометаллической ванной, что ведет к интенсивному остыванию ее поверхности с резким возрастанием сил поверхностного натяжения, которые стягивают не успевший сформироваться жидкий металл в отдельные капли. Поэтому чем медленнее движется дуга, тем более плавно возрастают силы поверхностного натяжения жидкометаллической ванны и разрыва ванны на капли не происходит. При этом в покрытие электрода желательно вводить элементы, уменьшающие поверхностное натяжение металла. Вследствие быстрой кристаллизации сварочной ванны при подводной сварке сохранить приближенное подобие процессов со сваркой на воздухе можно не увеличивая сварочный ток, а уменьшая скорость сварки так, чтобы количество наплавленного металла электрода на единицу длины сварного шва оставалось постоянным. Оптимальной стратегией при подводной сварке является не увеличение тока сварки, а уменьшение скорости сварки в 1,5...3,0 раза. Желателен переход на режимы сварки без коротких замыканий со специально подобранными покрытиями электродов. Можно сочетать увеличение тока сварки с уменьшением скорости сварки, причем, чем больше глубина погружения и чем длительнее и чаще происходят короткие замыкания, тем в большей степени необходимо уменьшать скорость сварки. Так же можно рекомендовать уменьшать теплопроводность покрытия электрода, например, увеличивая его толщину.

Дальнейшие исследования процессов нагрева электрода при подводной сварке должны быть посвящены исследованию влияния давления воды на парогазовый пузырь, состоящий из паров металла, паров элементов покрытия электрода и паров воды, каплю и плавление электрода.

Выводы и предложения. Показано, что расплавление электрода при подводной дуговой сварке сталей зависит от многих параметров, приводящих к различию в характеристиках сварного шва: диаметра электрода, типа и толщины его покрытия, пространственного расположения электрода, плотности тока в нем, режима сварки, длительности непрерывного интервала сварки, наличия или отсутствия коротких замыканий и величины кратности тока короткого замыкания источника питания, давления соленой или пресной воды на глубине, на которой осуществляется сварка, и ее температуры, подогрева электрода и теплообмена между электродом и омывающей его водой посредством теплопроводности че-

рез покрытие электрода, конвекции и теплоизлучения с поверхности электрода, температуры капли электродного металла, испарения с поверхности капли.

На расплавление электрода влияют два основных фактора. Первый фактор – это нагрев капли электрической дугой, увеличивающийся при отсутствии коротких замыканий и уменьшающийся при их наличии, второй фактор – нагрев электрода проходящим током, увеличивающийся при наличии коротких замыканий, и уменьшающийся при их отсутствии. При наличии коротких замыканий тепловое воздействия дуги на каплю расплавленного металла электрода уменьшается, ввиду периодических замыканий дугового промежутка, при этом уменьшается испарение металла с капли электрода. При больших кратностях тока короткого замыкания сварочного источника питания и большим суммарным временем коротких замыканий может наблюдаться недопустимый уровень нагрева электрода проходящим током.

По сравнению с дуговой сваркой покрытыми электродами в воздушной среде, при подводной сварке расплавление электрода затруднено, из-за интенсивного отвода тепла водой. Для улучшения качества сварного шва необходимо сварку вести при большей вкладываемой мощности, за счет увеличения тока (плотности тока в электроде), подбирать режимы сварки с наименьшим количеством коротких замыканий, или вообще без них, со специально подобранными для этого покрытиями электродов, снижать скорость сварки для лучшего прогрева изделия и электрода, уменьшать теплопроводность покрытия электрода, например, увеличивая толщину покрытия.

Список использованных источников

1. *К аналитическому определению коэффициента расплавления при дуговой сварке сталей* / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, О. И. Петриенко, А. М. Жерносеков // Вісник ЧДТУ. – 2012. – № 2. – С. 89-96.
2. *Изменение коэффициента расплавления покрытого сварочного электрода в процессе его нагрева и плавления при дуговой сварке сталей без коротких замыканий* / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, С. В. Рымар, О. И. Петриенко // Вісник ЧДТУ. – 2012. – № 3. – С. 110-120.
3. *Расплавление покрытого сварочного электрода при дуговой сварке сталей с короткими замыканиями* / И. В. Пентегов, В. Н. Сидорец, С. В. Рымар, О. И. Петриенко // Вісник ЧДТУ. – 2013. – № 1 (63). – С. 93-103.
4. *Варгафтик Н. Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.
5. *Беляев Н. М.* Основы теплопередачи / Н. М. Беляев. – К. : Выща шк., 1989. – 343 с.
6. *Шорин С. Н.* Теплопередача / С. Н. Шорин. – М.-Л. : Гос. из-во по строительству и архитектуре, 1952. – 339 с.
7. *Подводная сварка и резка металлов* / под ред. А. Е. Асниса. – К. : ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1980. – 96 с.
8. *Технология электрической сварки плавлением* / под ред. Б. Е. Патона. – М.-К. : Машгиз, 1962. – 663 с.