

УДК 621.791.3

**С. К. Павлюк, д-р техн. наук, проф., А. В. Лупачёв,
Ю. А. Цумарев, канд. техн. наук, доц.**

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ПОВРЕЖДЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ НА СТАЛИ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ И ДУГОВОЙ ПАЙКЕ

Выявлено различие в механизмах повреждения и разрушения цинкового покрытия на стали при сварке плавлением открытой дугой и дуговой пайке в аргоне: окисление и испарение цинка в нагретой зоне рядом со швом (при сварке плавлением) и преимущественное испарение цинка (при дуговой пайке). Исследованы возможности сохранения целостности цинкового покрытия при дуговой пайке.

Введение

Постоянно расширяется использование сталей с защитными антикоррозионными и декоративными покрытиями, увеличивающими жизненный цикл металлических конструкций. Среди сталей с покрытиями наиболее важное место занимают оцинкованные стали [1].

Цинковые покрытия являются активными. Они обеспечивают электрохимическую защиту металла на протяжении длительного, измеряемого десятилетиями, срока службы [2]. Во влажной атмосферной или жидкой среде цинковое покрытие не отслаивается, а постепенно утоняется, замедляя процесс коррозионного разрушения стали.

Высокая коррозионная стойкость оцинкованных сталей в атмосферных условиях объясняется тем, что на воздухе цинк покрывается тонким слоем основного карбоната, а во влажной среде образует плотный и практически нерастворимый слой гидроксида, препятствующий дальнейшему протеканию реакции. Цинковое покрытие на стали стойко в холодной воде и постепенно растворяется в горячей ($T > 80^\circ\text{C}$). В разбавленных кислотах цинковое покрытие легко растворяется с образованием соответствующих солей. В щелочных растворах цинк также растворяется [1].

Нагрев покрытия из цинка на воздухе при сварке и пайке приводит к образованию паров цинка, которые воспламеняются и сгорают зеленовато-белым пламенем, обра-

зую оксиды цинка в виде аэрозолей [3, 4].

Цинковые покрытия на стали получают: горячим цинкованием – погружением стальных листов или конструкций в расплав; электрохимическим осаждением (гальваностегией); высокотемпературным напылением; диффузионным способом, при котором в поверхность деталей, пересыпанных цинковой пылью, при нагреве до температуры $350\text{--}375^\circ\text{C}$ диффундируют атомы цинка. При всех способах цинкования между покрытием и сталью образуются связи через слой интерметаллидов Fe–Zn [5].

При сварке плавлением и высокотемпературной пайке возможно частичное или полное разрушение цинкового слоя, граничащего со швом. В некоторых случаях снятие цинкового покрытия с поверхностей участков свариваемого металла является составляющей технологии сварки оцинкованных сталей [6].

Участки покрытия с частично или полностью разрушенным цинковым слоем обладают пониженной коррозионной стойкостью, причем степень этого понижения существенно зависит от ширины участка повреждения покрытия в результате высокотемпературного нагрева при сварке или пайке. Поэтому при проектировании технологии сварки оцинкованных сталей ставится задача предотвращения разрушения прилежащего к шву цинкового покрытия, а в случае невозможности его сохранения –

обеспечение минимального утонения покрытия и сужение участка повреждения до ширины, при которой проявляется действие электрохимической защиты. Это не всегда удается, поэтому участки повреждения покрытия красят составами, содержащими алюминиевый или цинковый порошок. Радикальным вариантом решения проблемы является цинкование конструкции после завершения сварки и послесварочной обработки. Цинкование крупногабаритных конструкций после сварки не всегда возможно.

Разработан и используется в промышленности способ пайки оцинкованной стали, позволяющий при использовании проволоки из медных сплавов в защитной атмосфере инертного газа (аргона) минимально повредить покрытие.

В настоящей работе исследованы существующие возможности сохранения целостности цинкового покрытия на низкоуглеродистых сталях и выявлены пути

дальнейшего совершенствования технологии дуговой пайки.

Расчетная модель

Повреждение покрытия характеризуется шириной поврежденных участков и оставшейся после высокотемпературного нагрева толщиной слоя цинка. Эти параметры зависят от термического цикла сварки, определяющего характер процесса, ширину поврежденного участка, а также остаточную толщину покрытия, которая зависит от времени пребывания покрытия при температурах испарения и окисления.

Сварные конструкции различного назначения изготавливают из оцинкованных стальных листов толщиной 0,6–2 мм. Сварку и пайку стыковых и угловых соединений выполняют за один проход. Для этого случая Н. Н. Рыкалиным [7] разработана математическая модель нагрева пластины, геометрическая интерпретация которого представлена на рис. 1.

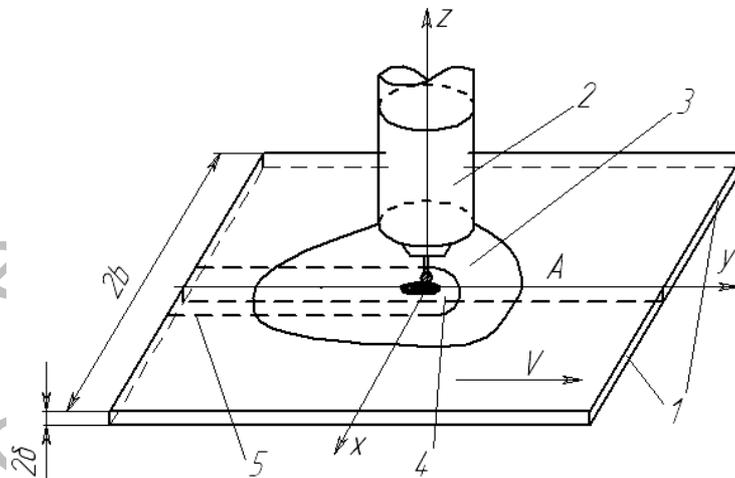


Рис. 1. Геометрическая интерпретация математической модели: 1 – пластины; 2 – горелка; 3 – зона защиты инертным газом; 4 – расплавленная ванна; 5 – граница шва

В исследуемой математической модели граница раздела по краям стальной пластины считается не пропускающей тепло:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x = \pm b} = 0,$$

где q – тепловая мощность источника тепла, Вт; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); T – температура, °С.

Поскольку сварка или пайка ведется за один проход достаточно мощным источником нагрева с большой

скоростью, $\frac{\partial T}{\partial y} \gg \frac{\partial T}{\partial x}$, источник тепла

считается линейным мощным быстро-движущимся. Для этого случая уравнение распределения температур при квазистационарном состоянии процесса распространения тепла в пластине имеет вид:

$$\Delta T(y, t) = \frac{q}{2V \delta c \rho \sqrt{\pi a t}} e^{-\frac{y^2}{4 a t} - b t}, \quad (1)$$

где $\Delta T(y, t)$ – приращение температуры рассматриваемой точки, находящейся на расстоянии y от точки O через время t от момента внесения тепла; q – тепловая мощность источника тепла, Вт; V – скорость сварки или пайки, м/с; δ – толщина металла, мм; c – удельная теплоемкость тела, кДж/(кг·К); ρ – плотность тела, кг/м³; e – основание натуральных логарифмов; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; t – время от момента внесения тепла, с; b – коэффициент температуроотдачи, Дж/(м²·с·К).

Коэффициент температуроотдачи определяется из выражения

$$b = \frac{2\alpha}{c\rho\delta}, \quad (2)$$

где α – коэффициент поверхностной теплоотдачи, Дж/(м²·с·К).

Этот коэффициент в расчетах брался для интервалов температур по графику [8].

$$\Delta T = T_0 + T,$$

где T_0 – начальная температура обрабатываемой пластины.

Полагаем, что тепловое сопротивление пластины состоит из теплового сопротивления стали и тепловых сопротивлений цинкового покрытия с двух сторон листа:

Табл. 1. Значения коэффициентов

Свойство	c_{cp} , Дж/(кг·К)	λ_{cp} , Вт/(м·К)	ρ_{cp} , кг/м ³	$c\rho_{cp} \cdot 10^6$	$a_{cp} \cdot 10^{-5}$, м ² /с
Значение свойств	446,722	62,614	7739,3	3,4534	1,8131

$$\frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{2\delta_{cy}}{\lambda_{cy}} = \frac{\delta_{cm} + 2\delta_{cy}}{\lambda_{cp}}, \quad (3)$$

где λ_{cm} , λ_{cy} – теплопроводность стали и цинка; λ_{cp} – условная средняя теплопроводность листа; δ_{cm} , δ_{cy} – толщина стали и цинка.

Массовые доли компонентов стали φ и цинка ψ пропорциональны соответствующим толщинам, поскольку плотности этих материалов примерно одинаковы:

$$\varphi = \frac{2\delta_{cy}}{\delta_{cm} + 2\delta_{cy}}; \quad \psi = \frac{\delta_{cm}}{\delta_{cm} + 2\delta_{cy}}. \quad (4)$$

Средняя плотность оцинкованного листа определена из выражения

$$\rho_{cp} = \varphi Fe + \psi Zn, \quad (5)$$

где φ , ψ – массовые доли компонентов, стали и цинка соответственно; Fe , Zn – в данном случае значения соответствующих свойств.

Средний коэффициент температуропроводности a_{cp} рассчитан по формуле

$$a_{cp} = \frac{\lambda_{cp}}{c_{cp}\rho_{cp}}, \quad (6)$$

где ρ_{cp} – средняя плотность; c_{cp} – средняя теплоемкость; определены исходя из аддитивной модели.

Рассчитанные значения коэффициентов теплопроводности, температуропроводности, теплоемкости и плотности оцинкованной стали толщиной 2 мм при толщине покрытия 0,1 мм представлены в табл. 1.

Разница в коэффициентах теплопроводности стали с цинковым покрытием и без него обратно пропорциональна толщине листа и составляет 4,36 % для $\delta = 2$ мм.

Полученные значения теплофизических величин использованы для расчета распределения температур, ширины зон и времени пребывания при температурах начала окисления, плавления и испарения цинка.

Логарифмируя выражение (1), а затем, продифференцировав его, из условия $\frac{\delta T}{\delta t} = 0$, находим выражение для определения максимальной температуры нагрева металла в точках, расположенных на оси $\pm y$:

$$T_0 + T_{\max} = \frac{0,242 q}{V \delta c \rho y_0} \left(1 - \frac{by^2}{2a} \right). \quad (7)$$

Величина $q/V\delta$ – удельная погонная энергия, показывающая, какое количество энергии затрачено на образование 1 м² сварного шва.

Эффективная тепловая мощность в формулах (1) и (2) определяется как

$$q = I U \eta,$$

где I – сила сварочного тока на дуге, А; U – напряжение на дуге, В; η – эффективный КПД нагрева металла дугой.

Из формулы (1) получим и другие выражения, необходимые для определения времени пребывания металла выше заданной температуры:

$$t = f \frac{\left(\frac{q}{V \delta} \right)^2}{\lambda c \rho (T - T_0)^2}, \quad (8)$$

где f – коэффициент, зависящий от безразмерной температуры $\theta = \frac{T - T_0}{T_{\max} - T_0}$;

T_{\max} – максимальная температура цикла; T – заданная температура; T_0 – начальная

температура. Значение коэффициента f определяется по номограмме [8].

Расчет толщины испарившейся части цинкового покрытия за время пребывания при температурах плавления и кипения осуществлен с использованием преобразованного уравнения Клапейрона-Менделеева [9].

$$m_i = (p_{\text{нас}} - p_i) \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}, \quad (9)$$

где m_i – скорость испарения с поверхности металла, кг/(м²·с); $p_{\text{нас}}$ – давление насыщенного пара; p_i – давление пара над испаряющимся веществом; m – масса атома испаряющегося металла; k – постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

Определение скорости испарения позволяет найти толщину слоя испаряющейся части покрытия при условии, что за счет обдувания потоком защитного газа пары цинка отводятся и $p_i = p_{\text{zn}} = 0$:

$$\delta_{\text{исп}} = p_{\text{нас}} \cdot \sqrt{\frac{M}{2\pi k T N_A}} \cdot \frac{t}{\rho}, \quad (10)$$

где M – молярная масса испаряющегося вещества; N_A – число Авогадро, ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹).

Обсуждение результатов

Исследовались процессы испарения цинка в зависимости от температуры режима нагрева оцинкованного листа. На рис. 2 показано распределение максимальных температур нагрева сваркой и пайкой в направлении, перпендикулярном оси шва. Распределение найдено для погонной энергии $q/V\delta = 9,6 \cdot 10^7$ Дж/м² для дуговой сварки и $q/V\delta = 5,76 \cdot 10^7$ Дж/м² для дуговой пайки.

В двух случаях приняты стандартные режимы сварки и пайки за один проход оцинкованного металла толщиной 2 мм.

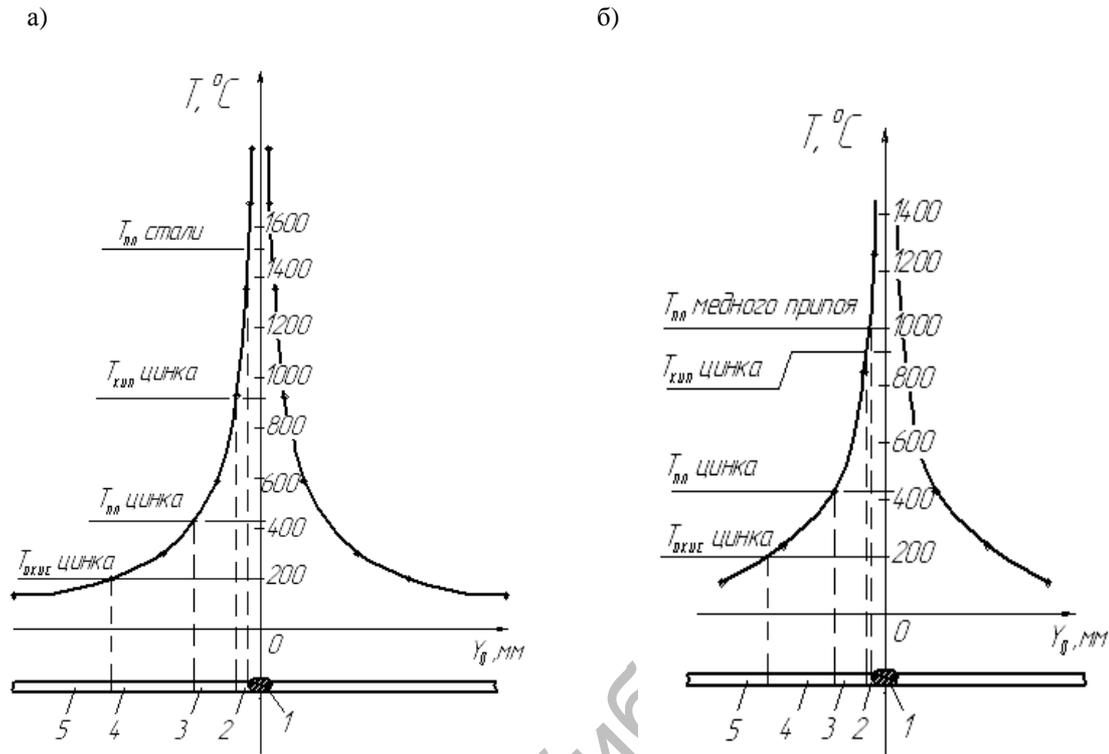


Рис. 2. Температурные условия нагрева цинкового покрытия на стали толщиной 2 мм: а – сварка в защитном газе стальной проволокой; б – дуговая пайка проволокой из медного сплава с $T_{пл} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$; 1 – шов; 2 – участок кипения покрытия; 3 – участок расплавления покрытия; 4 – участок окисления покрытия; 5 – основной металл с неизменным покрытием

Общая ширина зоны возможного повреждения цинкового покрытия для сварки в защитном газе составляет 28 мм. В этой зоне можно выделить три участка, отличающихся по механизму повреждения. Так, на участке 1, примыкающем к сварному шву и нагретом до температур кипения цинка (1500–911 °С), наблюдается интенсивное разрушение покрытия вследствие кипения и испарения цинка.

В связи с высоким сродством цинка к кислороду воздух и углекислый газ для цинка являются окислительной средой. Пары цинка из-за высокого сродства к кислороду окисляются при взаимодействии с кислородом воздуха, образуя дисперсные оксиды, являющиеся вредными веществами, которые переносятся нагретым воздухом и загрязняют зону дыхания сварщика.

Предотвратить окисление цинка можно использованием инертной газовой защиты не только расплавленного металла, но и участков, нагретых свыше 200 °С.

При этом парциальное давление кислорода в защитной атмосфере должно быть меньше упругости диссоциации оксида цинка, а значит, необходимо использовать для защиты аргон или гелий высокой чистоты. Образующийся слой дисперсных оксидов не препятствует испарению и окислению цинка. Процессы испарения и окисления приводят к полному разрушению цинкового покрытия на этом участке.

На участке 2 металл нагрет до температур 911–419 °С, превышающих температуру плавления цинка. Здесь возможен процесс окисления цинка при сварке открытой дугой. Интенсивность испарения цинка постепенно снижается по мере удаления от оси шва рассматриваемой точки металла в сторону точек, нагретых до температуры плавления.

При сварке покрытыми электродами или в углекислом газе на участке 3, нагретом до температур 419–200 °С, об-

разуются слои оксида цинка невысокой плотности, поэтому кислород из окислительной среды проникает к поверхности цинка. Остаточная толщина защитного слоя цинка зависит от времени пребывания металла при температурах окисления. Ширина участков, на которых происходит повреждение цинкового покрытия, линейно зависит от величины погонной энергии.

Длительность пребывания металла при температурах выше кипения, плавления

и окисления определяет степень повреждения цинкового покрытия. Это время увеличивается практически по линейной зависимости с ростом удельной погонной энергии сварки или пайки.

На рис. 3 показано время пребывания покрытия при температурах окисления, плавления и кипения цинка на разных участках околошовной зоны при сварке и пайке.



Рис. 3. Время пребывания металла покрытия при температурах окисления (1), плавления (2), кипения (3)

Расчет толщины испарившегося слоя цинка выполнен по выражению (9).

Величина r_i зависит от диффузионного слоя, через который атомы цинка при испарении диффундируют в окружающую среду. При естественном испарении цинка, когда отсутствует принудительное движение пара, процесс испарения цинка идет медленно. Однако испарение цинка существенно ускоряется при обтекании расплавленного цинкового покрытия потоком защитного газа, т. е. при пайке имеет место искусственное повышение скорости испарения.

Анализ выражения (10) показывает, что снижение парциального давления P_{Zn} над расплавленным металлом вследствие сдувания защитным газом интенсифицирует процесс разрушения покрытия из-за более быстрого испарения.

Оценим, насколько уменьшится толщина цинкового покрытия на разных участках зоны повреждения покрытия при разных режимах нагрева пайкой, т. е. в зависимости от времени пребывания при соответствующих температурах. Значения давления насыщенного пара взяты из графика (рис. 4).

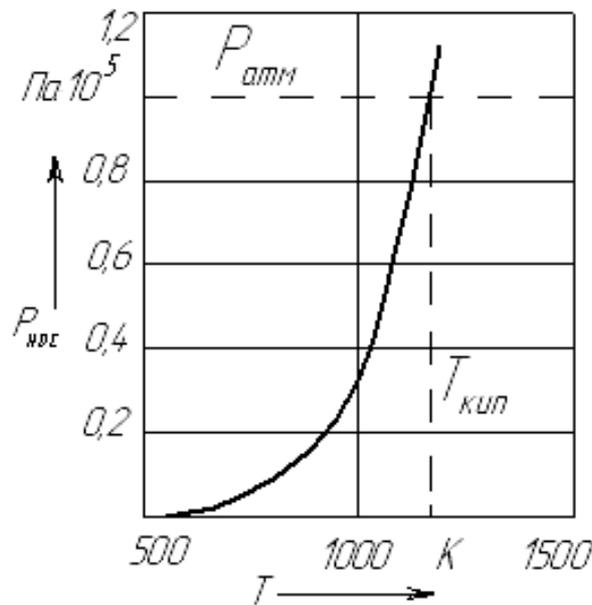


Рис. 4. Давление насыщенного пара цинка

На середине участка 1 кипения цинка время пребывания металла для сварки составляет 1,6 с, а при пайке – всего 0,48 с. Тем не менее, при сварке и пайке цинковое покрытие толщиной 0,05 мм испаряется полностью.

На участке 2 расплавления покрытия средняя толщина испарившегося слоя при сварке равна 0,185 мм, а при пайке – 0,108 мм. Если покрытие тонкое (менее 0,02 мм), то на участках испарения и окисления при сварке и пайке на исследованных режимах покрытие повреждается полностью.

На участке 3, нагретом до температур 419–200 °С, покрытие окисляется частично, а при защите зоны сварки инертным газом сохраняется полностью. Даже при относительном сохранении покрытия в соединениях, выполненных дуговой сваркой, металл шва совершенно не защищен от коррозии.

Границей паяного шва является температура ликвидуса сплава, используемого в качестве припоя. Эта температура достигает 1020 °С. Цинковое покры-

тие при пайке нагревается на узком участке шириной 6 мм. Это существенное преимущество дуговой пайки перед сваркой, где ширина этого участка на исследуемом режиме составляет 12 мм.

Экспериментально установлено, что сварку и пайку оцинкованных сталей целесообразно выполнять при рационально организованной защите зоны нагрева инертным газом, расход которого должен быть небольшим (4–5 л/мин), и обеспечивать ламинарный режим истечения газа при использовании горелки с цилиндрическим соплом диаметром 18–20 мм. Сварку и пайку можно выполнять в камере с защитной атмосферой из аргона высокой чистоты.

Протяженность всех участков практически линейно зависит от величины тепловложения, необходимого для образования единицы площади шва, т. е. от погонной энергии. Эти зависимости показаны на рис. 5.

Для получения качественного соединения необходимо использовать минимальную погонную энергию при

сварке и пайке. При этом снижается устойчивость горения дуги на малой силе сварочного тока, а также возникают трудности при ручном манипулировании и перемещении сварочной горелки на высоких

скоростях сварки. Последние две трудности преодолеваются путем механизации, автоматизации или роботизации процесса.

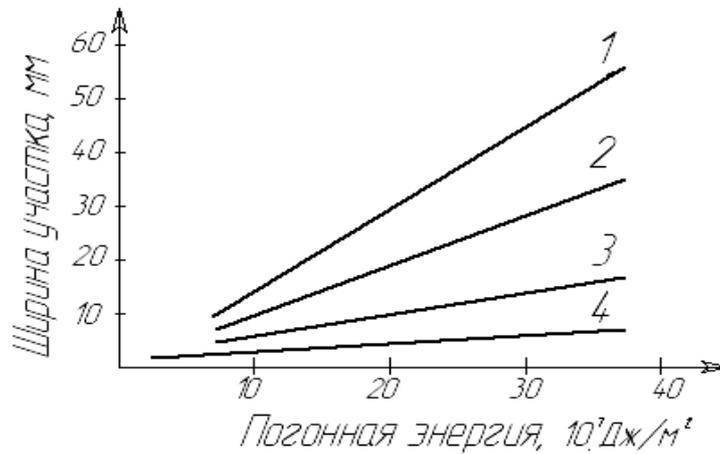


Рис. 5. Влияние погонной энергии на ширину участков повреждения покрытия при толщине металла 2 мм: 1 – участок окисления покрытия при сварке и пайке; 2 – участок плавления цинка при сварке и пайке; 3 – участок кипения цинка при сварке; 4 – участок кипения цинка при пайке

При пайке на малых токах ($I_d = 30\text{--}40 \text{ А}$, $U_d = 18 \text{ В}$, $V_{св} = 0,1 \text{ м/с}$) и погонной энергии $q/V\delta = 2,55 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^2$ цинковое покрытие может быть частично сохранено, поскольку толщина испарившегося слоя меньше первоначальной толщины цинкового покрытия.

Заключение

В новом технологическом процессе дуговой пайки оцинкованных сталей в среде аргона реализованы возможности сохранения целостности цинкового покрытия, сужения ширины поврежденных участков, что позволило существенно увеличить коррозионную стойкость соединений по сравнению со сваркой плавлением.

Это достигнуто при соблюдении следующих условий:

- ограничение температурного воздействия на цинковое покрытие за счет сокращения времени пребывания при высоких температурах;
- использование электродов малого

диаметра (до 1 мм) из медного сплава и соответствующее ограничение силы сварочного тока;

- применение тиристорных источников тока, позволяющих обеспечить устойчивое горение дуги на токах, начиная с 30–40 А;

- регулирование тепловложения в паемую деталь;

- модулирование тока высокой частоты и пропускание импульсов в те периоды времени, когда анодом является изделие;

- применение в качестве защитного газа аргона высокой чистоты;

- совершенствование струйной газовой защиты с таким расчетом, чтобы защитить не только шов, но и зону основного металла, нагретого до температуры выше $200 \text{ }^\circ\text{C}$, и обеспечить малые скорости истечения защитного газа из горелки при расходе 4–6 л/мин.

Дальнейшее совершенствование процесса дуговой сварко-пайки оцинкованных сталей предполагается вести по

следующим направлениям:

– применение новых и совершенствование известных процессов дуговой сварки, в том числе процесса сварки с холодным переносом электродного металла;

– разработка и использование проволочек из бронзы, содержащей олово, кремний и другие элементы с возможно более низкой температурой ликвидуса (900–910 °С) с тем, чтобы снизить протяженность зоны нагрева до температуры кипения цинка или полностью устранить эту зону;

– разработка состава цинкового покрытия для свариваемых или паяемых оцинкованных конструкций с тем, чтобы при нагреве выше 200 °С образовывались не рыхлые слои оксидов, а более плотные оксиды, например, содержащие кремний и олово, что одновременно позволит улучшить условия труда за счет снижения испарения цинка;

– рационализация конструкции соединений с целью уменьшения объемов наплавленного металла или припоя в швах и соответственного снижения теплоэнергетического воздействия на зону цинкового покрытия.

S. K. Pavluk, A. V. Lupachev, Y. A. Cumarev
Laws of damage and destruction zinc covering on steel at fusion welding and arc soldering

The distinction in mechanisms of damage and destruction of a zinc covering on steel is revealed at fusion welding by an open arch and arc soldering in argon: oxidation and evaporation of zinc in the heated up zone near to a seam – at fusion welding and primary evaporation of zinc – at the arc soldering. The opportunities of preservation of integrity of a zinc covering are investigated at the arc soldering.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов ; под ред. И. В. Семеновой. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
2. Цинковое покрытие Zinga против коррозии // Мир металла. – 2004. – № 2–3. – С. 60–63.
3. Безопасность труда производственных процессов : справочник / С. В. Белов [и др.] ; под общ. ред. С. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 448 с.
4. Гуревич, С. М. Справочник по сварке цветных металлов / С. М. Гуревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наукова думка, 1990. – 512 с.
5. Хряпин, В. Е. Справочник паяльщика / В. Е. Хряпин, А. В. Лакедемонский. – М. : Машиностроение, 1974. – 328 с.
6. Акулов, А. И. Технология и оборудование сварки плавлением : учебник / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. П. Демянцевич. – М. : Машиностроение, 1977. – 432 с.
7. Теория сварочных процессов : учебник для вузов по спец. «Оборудование и технология сварочного производства» / Под ред. В. В. Фролова. – М. : Высш. шк., 1988. – 559 с.
8. Сварка в машиностроении : справочник в 4 т. / Под ред. Н. А. Ольшанского. – М. : Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 604 с.
9. Кох, Б. А. Основы термодинамики металлургических процессов сварки / Б. А. Кох. – Л. : Судостроение, 1975. – 240 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 15.01.2008