



## Источники химической опасности. Опасные химические вещества

УДК 544.032:331.436

DOI: 10.25514/CHS.2022.2.23007

**Количественная оценка вредных для человека паров цинка при сварочных работах оцинкованных изделий***Д. Я. Исламхузин<sup>1</sup>, О. А. Тучкова<sup>1</sup>✉, Л. И. Хайруллина<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия, e-mail: touchkova-o-a@mail.ru

Поступила в редакцию: 05.07.2022 г.; после доработки: 23.08.2022 г.; принята в печать: 30.08.2022 г.

**Аннотация** – Вопрос обеспечения безопасности работников промышленных предприятий является одним из важных на данный момент. При проведении сварочных работ на персонал оказывают влияние вредные факторы производства. В процессе работ, связанных с электросваркой и резкой металлов, выделяются пыль железа и других металлов, газы, диоксид кремния, что приводит к формированию пневмокониоза электросварщиков и газорезчиков. Состав и количество образующейся высокодисперсной пыли зависит от вида сварки, состава применяемых сварочных материалов и свариваемых металлов, режима сварочного процесса и других факторов. Наиболее опасными для персонала являются выделения паров цинка при сварочных работах оцинкованных изделий. В результате такого воздействия здоровью персонала может быть нанесен значительный ущерб. Вдыхание паров цинка вызывает так называемую «цинковую» или «литейную лихорадку». В данной работе представлены результаты исследований по определению количества вредных веществ при контактной и электродуговой сварках. В ходе исследования было определено количество выделяемых вредных веществ при сварке деталей с защитным покрытием. Лишь обеспечение защитных мероприятий может снизить вредное воздействие данного фактора на работающих.

*Ключевые слова:* сварка, вредные вещества, отравление, цинк.

**Chemical hazard sources. Hazardous chemical substances**

UDC 544.032:331.436

DOI: 10.25514/CHS.2022.2.23007

**Quantitative assessment of zinc vapors harmful to humans during welding operations of galvanized products***Damir Ya. Islamhuzin<sup>1</sup>, Oksana A. Tuchkova<sup>1</sup>✉, and Liaisan I. Khairullina<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia,  
e-mail: touchkova-o-a@mail.ru

Received: July 5, 2022; Revised: August 23, 2022; Accepted: August 30, 2022

**Abstract** – The issue of ensuring the safety of industrial workers is one of the most important at the moment. During welding operations, harmful factors of production affect the personnel. In the

process of work related to electric welding and cutting of metals, iron and other metal dust, gases, silicon dioxide are released, which leads to the formation of pneumoconiosis of electric welders and gas cutters. The composition and amount of highly dispersed dust formed depends on the type of welding, the composition of the welding materials used and the metals being welded, the mode of the welding process and other factors. The most dangerous for personnel are the release of zinc vapor during welding of galvanized products. As a result of such exposure, significant damage may be caused to the health of personnel. Inhalation of zinc vapor causes so-called "zinc" or "foundry fever". This paper presents the results of studies to determine the amount of harmful substances during contact and electric arc welding. During the study, the amount of harmful substances released during welding of parts with a protective coating was determined. Only the provision of protective measures can reduce the harmful effects of this factor on workers.

*Keywords:* welding, harmful substances, poisoning, zinc.

---

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в связи с развитием промышленности, машиностроения и хозяйственной деятельности все чаще применяются стальные материалы с защитными покрытиями. К защитным материалам относятся цинк, окрашенные поверхности. Бывают оцинкованные покрытия: крыши, забор и т.д. (профнастил). Часто используются детали с цинковым покрытием при строительстве, в автомобильной промышленности, так как детали с цинковым покрытием более устойчивы к атмосферным и коррозионным явлениям. В связи с обширным применением приходится оцинкованные материалы соединять с помощью сварки, в результате чего происходит выделение паров цинка, которые являются очень токсичными и вредными для организма человека.

Отравлению цинком и его соединениями посвящено множество работ [1, 2, 3], т.к. данный вид отравления имеет место не только в сварочных работах, а также при цинковании металлов, литевых работах и т.д.

Технический цинк содержит примеси свинца и мышьяка. Окись цинка – это белый рыхлый порошок с предельно допустимой концентрацией (ПДК)  $6 \text{ мг/м}^3$  [1]. Металлический цинк серебристо-белого цвета с температурой плавления  $419,5^\circ\text{C}$  и температурой кипения  $906,2^\circ\text{C}$ . На воздухе быстро окисляется и покрывается матовой пленкой окисла, который предохраняет металл от дальнейшего окисления. Промышленное получение чистого цинка основано на электролизе раствора солей цинка. Известны многочисленные соединения цинка, которые используются в различных отраслях [2].

На производстве цинк встречается в виде тумана (оксици цинка), относительно безопасного соединения при соблюдении мер индивидуальной защиты. При отсутствии мер индивидуальной защиты, цинк поступает в организм непосредственно через органы дыхания, отчасти желудочно-кишечный тракт, например, при заглатывании пыли. Вдыхание паров цинка опасно, поскольку может вызвать так называемую «цинковую» или «литейную лихорадку», хотя непосредственно металлический цинк в твердом и пылеобразном состоянии является нетоксичным. При более длительном

воздействии окиси цинка возможно развитие медленно прогрессирующего пневмокониоза [1].

В случаях смертельного исхода выявляются дистрофические изменения, особенно выраженные в сердечной мышце, печени и почках [2, 3].

При сварке и резке металлов образуется высокодисперсный аэрозоль, который содержит пыль железа и других металлов, газы, обладающие токсичными и раздражающими свойствами, и диоксид кремния. Количество выделений в первую очередь зависит от вида сварки, режима сварочного процесса, состава используемых сварочных материалов и свариваемых металлов. В результате негативного воздействия у электросварщиков и газорезчиков могут наблюдаться пневмокониозы, а также другие сопутствующие профессиональные заболевания, такие как: хронический бронхит, бронхиальная астма, интоксикация марганцем, острое поражение верхних дыхательных путей и легких, «литейная лихорадка» [1].

Таким образом, основной опасностью для сварщика при проведении сварочных работ деталей с защитным цинковым покрытием является так называемая «цинковая лихорадка», обусловленная интенсивным испарением цинка и попадания паров в зону дыхания. За оценочный критерий степени опасности принимается предельно допустимая концентрация оксида цинка, равная  $0,5 \text{ мг/м}^3$  [4].

## РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

### *Расчет количества цинка, выделяющегося при сварке*

В качестве исследуемого шва, выполненного ручной электродуговой сваркой, принимается стыковой шов длиной 1 м пластин толщиной  $s$ . В качестве исследуемого шва, выполненного контактной сваркой, принимается точечная контактная сварка пластин с толщинами  $s_1$  и  $s_2$ . Это обусловлено тем, что точечная контактная сварка наиболее распространена в народном хозяйстве и может использоваться в небольших сварочных производствах, где не обеспечивается должный уровень вентиляции. Роликовые и стыковые виды контактной сварки, как правило, используются в серьезных автоматизированных производствах, оснащенных хорошей системой вентиляции и высоким уровнем обеспечения санитарно-гигиенических норм рабочих мест. Расчет количества цинка производится из расчета на одну точку.

Основным тезисом, лежащим в основе расчета количества испаряющегося цинка с поверхности свариваемых деталей, является следующее предположение: во время сварки испаряется весь цинк, находящийся в зоне сварного шва, температура которого выше или равна температуре испарения цинка.

Тогда массу испарившегося цинка  $M_{ц}$  (кг) можно найти по формуле:

$$M_{ц} = S_{исп} \cdot \delta_{оц} \cdot \rho_{ц}, \quad (1)$$

где:  $S_{исп}$  – площадь зоны сварного шва, ограниченной температурой испарения цинка ( $t \geq t_{исп} = 906,2^\circ\text{C}$ ),  $\text{м}^2$ ;  $\delta_{оц}$  – толщина цинкового покрытия, м;  $\rho_{ц}$  – плотность цинкового покрытия,  $\text{кг/м}^3$ .

Следовательно, основной задачей при вычислении  $M_{ц}$ , является получение формулы для расчета  $S_{исп}$ .

Для ручной электродуговой сварки (рис. 1а):

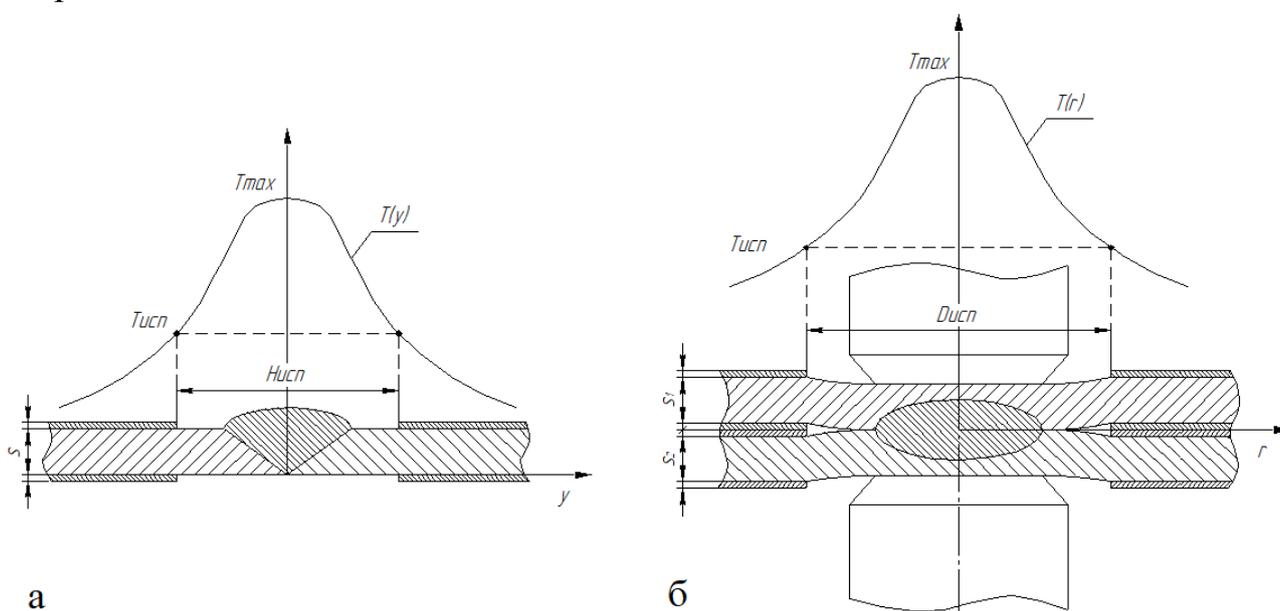
$$S_{исп} = 2 \cdot H_{исп} \cdot L_{исп}, \quad (2)$$

где:  $H_{исп}$  – ширина зоны сварного шва, ограниченная условием  $t \geq t_{исп}$ , м;

$L_{исп}$  – длина сварного шва, принимается  $L_{исп} = 1$  м.

Умножение на 2 принимается для учета испарения цинка с обеих сторон свариваемых пластин.

На рисунке 1 представлена расчетная схема для электродуговой (а) и контактной сварки (б). Расчетная схема представляет собой график изменения температуры в поперечном сечении сварного шва. Область испарения цинка ограничена шириной  $H_{исп}$  для электродуговой сварки и  $D_{исп}$  для контактной сварки.



**Рис. 1.** Расчетная схема для электродуговой (а) и контактной сварки (б),  $y$  и  $r$  – расстояния от оси шва.

**Fig. 1.** Calculation scheme for electric arc (a) and contact welding (b),  $y$  and  $r$  are the distances from the seam axis.

Для одной точки контактной сварки (рис. 1б):

$$S_{исп} = 4 \cdot \pi \frac{D_{исп}^2}{4}, \quad (3)$$

где:  $D_{исп}$  – диаметр зоны, ограниченной условием  $t \geq t_{исп}$ , м. Умножение на 4 принимается для учета испарения цинка с обеих сторон свариваемых внахлест пластин.

Для определения  $H_{исп}$  и  $D_{исп}$  необходимо рассмотреть температурные поля при электродуговой и контактной точечной сварке.

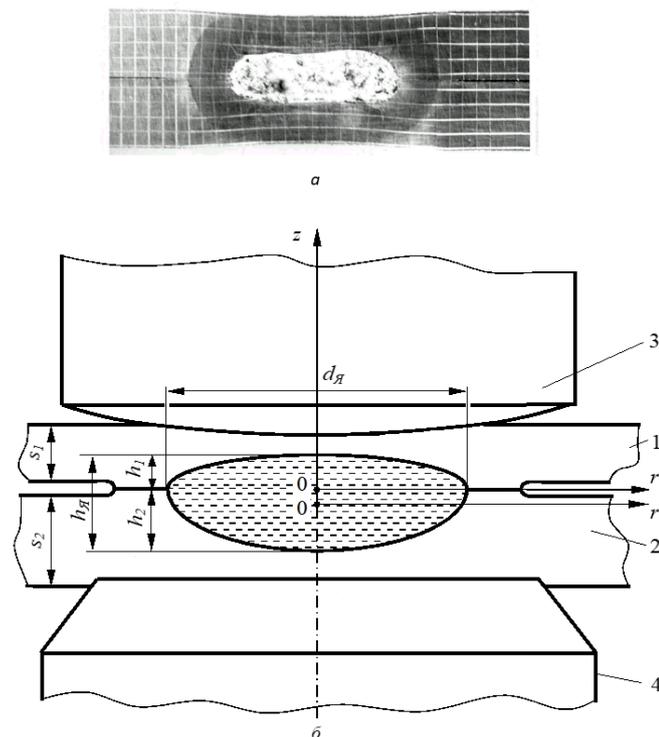
### Основные параметры сварных соединений при контактной сварке.

При контактной сварке ядро расплавленного металла (рис. 2а, 2б) характеризуют его размерами: диаметром  $d_{я}$  в плоскости контакта деталь-деталь (свариваемого контакта), и высотой  $h_{я}$  или проплавлением деталей  $A_1$  и  $A_2$ . Последние определяют отдельно для каждой детали как отношение к толщине деталей  $s_1$  и  $s_2$  расстояний  $h_1$  и  $h_2$  от плоскости свариваемого контакта до границы зоны расплавленного металла и выражают обычно в процентах [5]:

$$A_1 = (h_1/s_1) \cdot 100\%, \quad A_2 = (h_2/s_2) \cdot 100\%, \quad (4)$$

Размеры ядра ( $d_{я}$ ,  $h_{я}$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ) в наибольшей степени влияют на прочностные свойства точечного соединения.

На рисунке 2 представлен вид точечного сварного соединения (а) и схема его геометрических параметров (б) в случае сварки деталей не равных толщин [5].



**Рис. 2.** Вид точечного сварного соединения (а) и схема его геометрических параметров (б) в случае сварки деталей не равных толщин 1 и 2 электродами 3 и 4:  $s_1$ ,  $s_2$  – толщина деталей 1 и 2;  $d_{я}$  и  $h_{я}$  – диаметр и высота ядра расплавленного металла;  $h_1$ ,  $h_2$  – высота зоны расплавления в деталях.

**Fig. 2.** The type of spot welded joint (a) and the scheme of its geometric parameters in the case of welding parts of unequal thicknesses with 1 and 2 electrodes 3 and 4:  $s_1$ ,  $s_2$  – thickness of parts 1 and 2;  $d_{я}$  and  $h_{я}$  – diameter and height of the core of the molten metal;  $h_1$ ,  $h_2$  – height of the melting zone in details.

Значение диаметра ядра зависит от толщины свариваемых деталей  $s$  и может быть рассчитано по формуле [5]:

$$d_{я} = 2s + 3. \quad (5)$$

В большинстве случаев величина проплавления деталей  $A_1$  и  $A_2$  должна находиться в пределах 20...80% от толщины деталей. С учетом этого, для инженерных расчетов может быть использована формула:

$$h_{я} \approx \frac{s_1 + s_2}{2}. \quad (6)$$

Так как нас интересует момент максимальной температуры нагрева, то изменение температуры по координате  $r$  (рис.1 б, рис. 2 б) в момент выключения сварочного тока, можно рассчитать по зависимости [5]:

$$t_r(r) = t_{ПЛ} \exp\left(a_z^2 \left( \left[ \frac{h_{я}}{2} \right]^2 - \left[ \frac{h_{я}}{d_{я}} \right]^2 r^2 \right)\right), \quad (7)$$

где:  $t_{ПЛ}$  – температура плавления свариваемых пластин;  $a_z$  – коэффициент, определяемый по формуле:

$$a_z = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{t_{ПЛ}}{t_{\text{э}}}\right)}{s^2 - \left(\frac{h_{я}}{2}\right)^2}}, \quad (8)$$

$t_{\text{э}}$  – максимальное значение температуры в контакте электрод-деталь, определяемое по формуле:

$$t_{\text{э}} = t_{ПЛ} \left( 0,1 + 0,8 \sqrt{\frac{h_{я}}{2s}} \right). \quad (9)$$

Согласно [5], формула (7) хорошо согласуется с результатами численных расчетов температурных полей при контактной сварке, и может быть применена для инженерных расчетов.

Таким образом, для инженерных расчетов в качестве исходных данных к формуле (7) достаточно задать температуру плавления  $t_{ПЛ}$  и толщину свариваемых деталей  $s_1$  и  $s_2$ . Толщину  $s$  можно принять как среднюю толщину свариваемых деталей  $s = (s_1 + s_2)/2$ .

### **Основные параметры стыковых сварных соединений при электродуговой сварке**

На процесс распространения тепла в металле, нагреваемом сварочной дугой, влияют эффективная тепловая мощность сварочной дуги и распределение теплового потока по поверхности металла; размеры и форма свариваемых изделий, теплофизические свойства металла, условия теплообмена с окружающими предметами.

Электрическая энергия, потребляемая дугой, в основном превращается в тепловую. Эффективная тепловая мощность  $q$  процесса нагрева изделия сварочной дугой можно найти по формуле [6]:

$$q = \mu \cdot I \cdot U, \quad (10)$$

где:  $I$  и  $U$  – сила тока и падение напряжения на дуге;  $\mu=0,7 \div 0,85$  – эффективный КПД процесса нагрева изделия дугой, представляет отношение количества тепла, передающегося от дуги к металлу, к мощности электрической дуги.

В таблице 1 приведены рабочие напряжения и сила тока при дуговой сварке в зависимости от толщины листов.

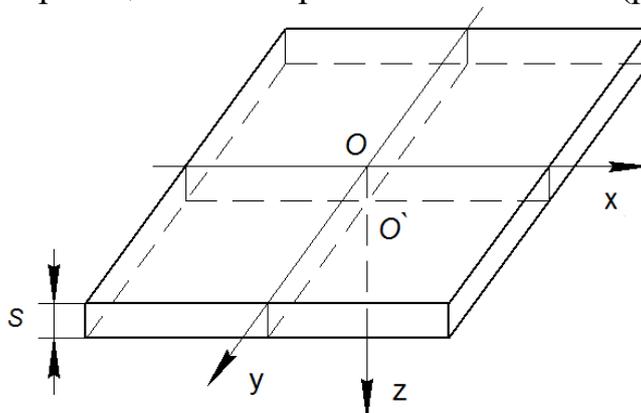
**Таблица 1.** Рабочие напряжения и сила тока при дуговой сварке в зависимости от толщины листов

**Table 1.** Operating voltages and current strength during arc welding depending on the thickness of the sheets

Толщина свариваемого металла, мм	Диаметр электрода, мм	Голые электроды		Обмазанные электроды		Обмотанные электроды	
		V	A	V	A	V	A
1,5	1	12–14	30–40	14–16	30–40	30–32	30–40
2	2	14–16	40–60	16–18	40–60	30–32	40–50
3	2	16–18	60–80	16–18	60–80	30–32	50–60
4–6	3	16–18	80–100	18–20	70–90	28–30	60–70
7–8	3	17–20	100–120	18–20	90–100	28–30	70–80
9–10	4	17–20	120–140	18–21	100–120	28–30	80–90
11–15	4	17–20	140–160	18–21	120–140	28–30	90–100
16–20	5	18–20	160–180	18–22	140–160	27–29	100–130
21–35	6	18–22	180–220	20–24	160–200	26–28	130–160
36–40	6	18–22	180–220	20–24	160–200	26–28	130–160

Как уже было сказано выше, в качестве исследуемого шва в данной работе принимается стыковой шов тонких пластин. Следовательно, размеры и форма свариваемых изделий определяется формой стыкового шва тонких пластин. Данному шву соответствует расчетная схема «Пластина» [6].

Пластина, т.е. плоский слой малой толщины  $s$ , занимающий область  $0 \leq z \leq s$ , т.е. тело, ограниченное параллельными плоскостями  $z=0$  и  $z=s$ , неограниченно простирающийся в направлениях  $OX$  и  $OY$  (рис. 3);



**Рис. 3.** Расчетная схема теплопроводящего тела и источника тепла при нагреве дугой.

**Fig. 3.** Design scheme of a heat-conducting body and a heat source when heated by an arc.

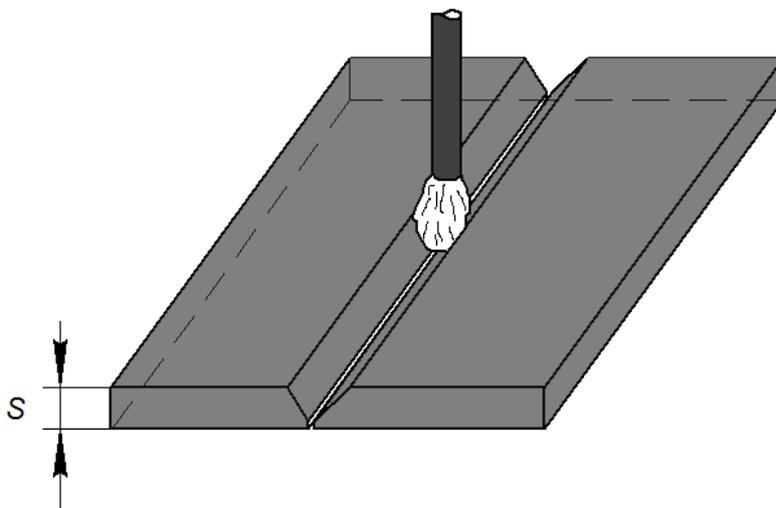
При сварке листов встык целесообразно считать, что тепло дуги приложено к линейному элементу  $OO'$  (рис. 3) [6]. Это означает, что тепло передается одновременно по всей толщине металла одинаково и, соответственно, источник тепла является линейным источником.

Для исследуемого шва принимается схема непрерывно действующего быстродвижущегося источника тепла. Скорость движения электрода может варьироваться [6]:

$$v = 1 \div 6 \text{ мм/с.} \quad (11)$$

При перемещении источника образуется зона нагрева в виде узкой полосы вдоль пути его перемещения. Тепло распространяется в направлении, перпендикулярном оси перемещения источника, поэтому расчетные схемы, которые описывают процесс распространения тепла, значительно упрощаются [6].

Следовательно, совокупная расчетная схема исследуемого стыкового шва состоит в следующем: распространение тепла при нагреве пластины мощным быстродвижущимся линейным источником (рис. 4).



**Рис. 4.** Расчетная схема исследуемого стыкового шва при нагреве пластины мощным быстродвижущимся линейным источником.

**Fig. 4.** Design scheme of the butt joint under study when the plate is heated by a powerful fast-moving linear source.

По мере увеличения скорости перемещения линейного источника тепла  $v$ , и при пропорциональном увеличении его мощности  $q$  размеры зон, нагретых до определенной температуры, увеличиваются; длина зон увеличивается пропорционально скорости, а ширина возрастает, стремясь к определенному пределу [6].

Уравнение предельного состояния процесса распространения тепла при нагреве пластины мощным быстродвижущимся линейным источником выражается формулой [6]:

$$T(y,t) = \frac{q}{v \cdot s \cdot \sqrt{4\pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot t}} \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot a \cdot t} - b \cdot t\right). \quad (12)$$

Согласно данному уравнению, температура в каждой точке возрастает и падает после прохождения источника тепла. Нас интересуют только максимальные значения температур, которые достигаются в зоне шва независимо от времени. Согласно [6] из данного уравнения получается уравнение для максимальных температур:

$$T_m(y) = \frac{0,484 \cdot q}{v \cdot c \cdot \rho \cdot s \cdot 2 \cdot y} \left( 1 - \frac{b \cdot y^2}{2 \cdot a} \right), \quad (13)$$

где:  $c$  – удельная теплоемкость свариваемого металла, Дж/кг·К;  $\rho$  – плотность свариваемого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $b$  – коэффициент теплоотдачи, 1/сек, определяемый по формуле:

$$b = \frac{2 \cdot \alpha_0}{c \cdot \rho \cdot s}, \quad (14)$$

$a$  – коэффициент теплопроводности, м<sup>2</sup>/с, определяемый по формуле:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (15)$$

$\alpha_0$  – коэффициент поверхностной теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности свариваемого металла, Вт/мК.

#### ***Расчет массы цинка при контактной сварке.***

Расчитать массу испаряющегося цинка можно по формулам (1), (2) и (3).

Как правило, толщина цинка на поверхности деталей варьируется от 2 до 270 мкм. Рассматриваемые толщины пластин от 0,4 до 6 мм. Толщина пластин при контактной сварке варьируется от 0,4 до 6 мм; толщина пластин при электродуговой сварке варьируется от 1,5 до 6 мм.

***Пример расчета массы испаряющегося цинка при точечной контактной сварке пластин толщиной  $s_1 = s_2 = 1$  мм и толщиной цинкового покрытия***

$$\delta_{Oц} = 2 \text{ мкм}$$

Сначала определим справочные величины, общие для всех случаев сварки. Из формул (1) ÷ (9) следует, что температура плавления металла пластин  $t_{пл}$ , плотность цинка  $\rho_{ц}$  и температура испарения цинка  $t_{исп}$  для всех случаев могут быть приняты одинаковыми:

$$t_{пл} = 1530^\circ\text{C}; \quad \rho_{ц} = 7100 \text{ кг/м}^3; \quad t_{исп} = 906,2^\circ\text{C}$$

Расчетная толщина свариваемых пластин:

$$s = \frac{s_1 + s_2}{2} = \frac{1 + 1}{2} = 1 \text{ мм}$$

Диаметр ядра проплавленного металла определим по формуле (5):

$$d_{я} = 2s + 3 = 2 \cdot 1 + 3 = 5 \text{ мм.}$$

Высоту ядра проплавленного металла определим по формуле (6):

$$h_{я} = \frac{s_1 + s_2}{2} = \frac{1 + 1}{2} = 1 \text{ мм.}$$

Максимальное значение температуры в контакте электрод-деталь, определяемое по формуле (9):

$$t_{\text{э}} = t_{\text{ПЛ}} \left( 0,1 + 0,8 \sqrt{\frac{h_{я}}{2s}} \right) = 1530 \left( 0,1 + 0,8 \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 1}} \right) = 1018,5^{\circ}\text{C}$$

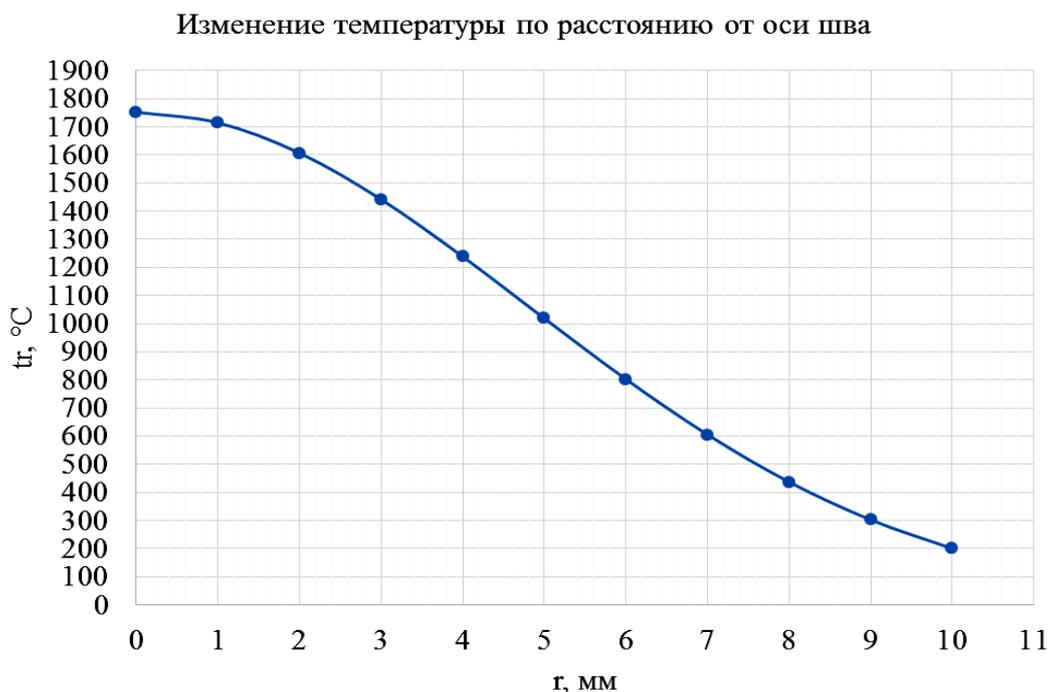
Коэффициент  $a_z$  определяется по формуле (8):

$$a_z = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{t_{\text{ПЛ}}}{t_{\text{э}}}\right)}{s^2 - \left(\frac{h_{я}}{2}\right)^2}} = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{1530}{1018,5}\right)}{1^2 - \left(\frac{1}{2}\right)^2}} = 0,737.$$

Изменение температуры по координате  $r$  получим из зависимости (7):

$$t_r(r) = t_{\text{ПЛ}} \exp\left( a_z^2 \left( \left[ \frac{h_{я}}{2} \right]^2 - \left[ \frac{h_{я}}{d_{я}} \right]^2 r^2 \right) \right) = 1530 \exp\left( 0,737^2 \left( \left[ \frac{1}{2} \right]^2 - \left[ \frac{1}{5} \right]^2 r^2 \right) \right).$$

По полученной зависимости для  $t_r(r)$  строим график (рис. 5), по которому определяем, что температура испарения цинка  $t_{\text{исн}} = 906,2^{\circ}\text{C}$  достигается на расстоянии  $r_{\text{исн}} = 5,5$  мм от оси шва.



**Рис. 5.** Изменение температуры по координате  $r$  при точечной контактной сварке пластин толщиной  $s=1$  мм.

**Fig. 5.** Temperature change in the  $r$  coordinate during spot contact welding of plates with a thickness of  $s = 1$  mm.

Следовательно, диаметр зоны, ограниченной условием  $t \geq t_{исп}$ :

$$D_{исп} = 2 \cdot r_{исп} = 2 \cdot 5,5 = 11 \text{ мм}$$

Тогда, согласно формуле (3), найдем:

$$S_{исп} = 4 \cdot \pi \frac{D_{исп}^2}{4} = 4 \cdot \pi \frac{0,011^2}{4} = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Находим массу испарившегося цинка по формуле (1):

$$M_{ц} = S_{исп} \cdot \delta_{оц} \cdot \rho_{ц} = 3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 7100 = 5,4 \text{ мг}$$

Следовательно, при точечной контактной сварке пластин толщиной  $s_1 = s_2 = 1 \text{ мм}$  и толщиной цинкового покрытия  $\delta_{оц} = 2 \text{ мкм}$  испаряется 5,4 мг цинка на одну точку шва.

В таблице 2 представлены результаты аналогичных расчетов массы испарившегося цинка для пластин и цинковых покрытий с разными толщинами на одну точку контакта.

**Таблица 2.** Масса паров цинка для пластин разных толщин, мг/точка

**Table 2.** Zinc vapor mass for plates of different thicknesses, mg/point

Толщина пластин s, мм	Толщина покрытия $\delta_{оц}$ , мкм							
	2	5	10	40	100	150	200	270
0,4	3,1	7,8	15,7	62,6	156,6	234,9	313,2	422,8
0,5	3,5	8,7	17,3	69,4	173,5	260,2	347,0	468,4
0,8	4,6	11,5	22,9	91,8	229,4	344,2	458,9	619,5
1,0	5,4	13,6	27,1	108,4	271,1	406,6	542,2	731,9
2,0	10,6	26,6	53,1	212,5	531,3	797,0	1062,6	1434,6
3,0	15,0	37,5	75,1	300,3	750,7	1126,0	1501,3	2026,8
4,0	22,0	55,1	110,2	440,6	1101,6	1652,4	2203,2	2974,3
5,0	29,7	74,2	148,3	593,3	1483,3	2225,0	2966,6	4005,0
6,0	37,8	94,6	189,2	756,6	1891,5	2837,3	3783,0	5107,1

### **Расчет массы цинка при электродуговой сварке**

Сначала определим справочные величины, общие для всех случаев сварки. Из формул (10) ÷ (13) следует, что плотность свариваемого металла  $\rho$ , плотность цинка  $\rho_{ц}$ , температура испарения цинка  $t_{исп}$ , удельная теплоемкость  $c$  и коэффициент теплопроводности  $\lambda$  свариваемого металла при средней температуре сварки  $500^\circ\text{C}$ , коэффициент поверхностной теплоотдачи  $\alpha_0$  для всех случаев могут быть приняты одинаковыми:

$$\rho = 7850 \text{ кг/м}^3; \rho_{ц} = 7100 \text{ кг/м}^3; t_{исп} = 906,2^\circ\text{C};$$

$$c = 670,4 \text{ Дж/кгК}; \lambda = 41,9 \text{ Вт/мК}; \alpha_0 = 33,52 \text{ Вт/м}^2\text{К}.$$

Среднюю скорость движения электрода так же допустимо принять для всех случаев одинаковой:

$$v = 3 \text{ мм/с}$$

**Пример расчета массы испаряющегося цинка при электродуговой сварке обмазанными электродами пластин толщиной  $s = 3$  мм и толщиной цинкового покрытия  $\delta_{оц} = 2$  мкм**

Из таблицы 1 для толщины пластины 3 мм принимаем силу тока  $I=80$  А, рабочее напряжение  $U=16$  В.

Тогда эффективную тепловую мощность  $q$  процесса нагрева находим по формуле (10):

$$q = \mu \cdot I \cdot U = 0,7 \cdot 80 \cdot 16 = 896 \text{ Вт}$$

Коэффициент теплоотдачи определяем по формуле (14):

$$b = \frac{2 \cdot \alpha_0}{c \cdot \rho \cdot s} = \frac{2 \cdot 33,52}{670,4 \cdot 7850 \cdot 0,003} = 4,246 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$$

Коэффициент теплопроводности определяемый по формуле (15):

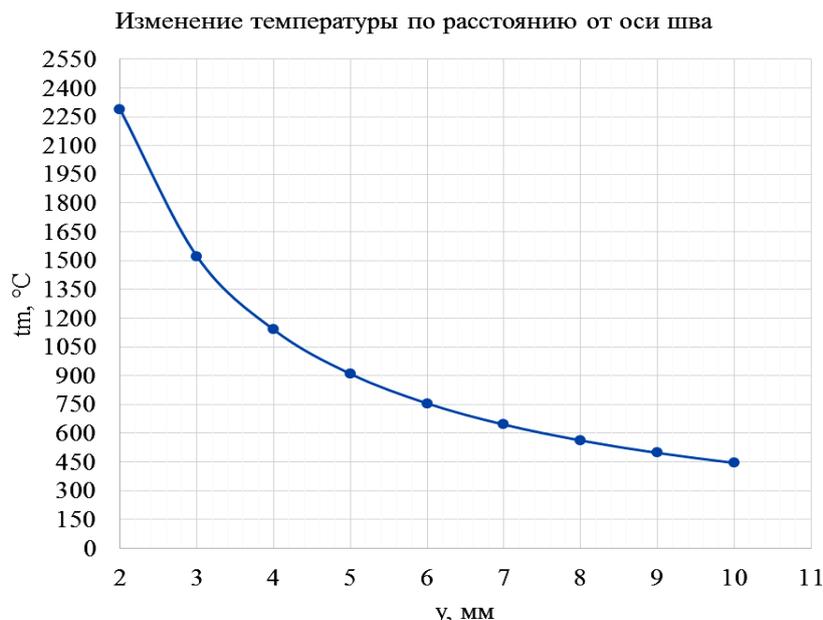
$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} = \frac{41,9}{670,4 \cdot 7850} = 7,962 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Тогда получаем уравнение для максимальных температур для данного случая по зависимости (13):

$$t_m(y) = \frac{0,484 \cdot q}{v \cdot c \cdot \rho \cdot s \cdot 2 \cdot y} \left( 1 - \frac{b \cdot y^2}{2 \cdot a} \right) = \frac{0,484 \cdot 896}{0,003 \cdot 670,4 \cdot 7850 \cdot 0,003 \cdot 2 \cdot y} \cdot$$

$$\left( 1 - \frac{4,246 \cdot 10^{-3} \cdot y^2}{2 \cdot 7,962 \cdot 10^{-6}} \right) = \frac{4,578}{y} (1 - 266,64 \cdot y^2)$$

По полученной зависимости для  $t_m(y)$  строим график (рис. 6), по которому определяем, что температура испарения цинка  $t_{исп} = 906,2^\circ\text{C}$  достигается на расстоянии  $y_{исп} = 5$  мм от оси шва.



**Рис. 6.** Изменение температуры перпендикулярно оси стыкового шва при электродуговой сварке пластин толщиной  $s=3$  мм.

**Fig. 6.** Temperature change perpendicular to the axis of the butt weld during electric arc welding of plates with a thickness of  $s = 3$  mm.

Ширина зоны сварного шва  $H_{усп}$ , ограниченной условием  $t \geq t_{усп}$ :

$$H_{усп} = 2 \cdot y_{усп} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ мм.}$$

Тогда, согласно формуле (2), найдем:

$$S_{усп} = 2 \cdot H_{усп} \cdot L_{усп} = 2 \cdot 0,01 \cdot 1 = 0,02 \text{ м}^2.$$

Находим массу испарившегося цинка по формуле (1):

$$M_{ц} = S_{усп} \cdot \delta_{оц} \cdot \rho_{ц} = 0,02 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 7100 = 284 \text{ мг.}$$

Следовательно, при электродуговой сварке пластин толщиной  $s=3$  мм и толщиной цинкового покрытия  $\delta_{оц}=2$  мкм испаряется 284 мг цинка на один метр шва.

В таблице 3 представлены результаты аналогичных расчетов массы испарившегося цинка для пластин с разными толщинами и с разными толщинами цинковых покрытий на один метр шва.

**Таблица 3.** Масса паров цинка для пластин разных толщин, мг/м

**Table 3.** Zinc vapor mass for plates of different thicknesses, mg/m

Толщина пластин $s$ , мм	Толщина покрытия $\delta_{оц}$ , мкм							
	2	5	10	40	100	150	200	270
1,5	248,5	621,3	1242,6	4970,3	12425,8	18638,6	24851,5	33549,5
2	318,7	796,9	1593,7	6375,0	15937,4	23906,2	31874,9	43031,1
3	284,0	712,6	1425,1	5700,4	14251,0	21376,5	28502,0	38477,7
4	271,1	677,8	1355,7	5422,7	13556,7	20335,1	27113,4	36603,1
5	217,4	543,5	1086,9	4347,8	10869,5	16304,2	21739,0	29347,6
6	181,3	453,3	906,7	3626,7	9066,8	13600,3	18133,7	24480,5

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При контактной сварке количество испаряющегося цинка возрастает пропорционально толщине свариваемых пластин и пропорционально толщине цинкового покрытия.

При электродуговой сварке с увеличением толщины свариваемых деталей количество испаряющегося цинка сначала растет, потом начинает снижаться. Это связано с уменьшением ширины зоны сварного шва  $H_{усп}$ , ограниченной условием  $t \geq t_{усп}$  в связи с распространением тепла вглубь металла. Из этого следует, что количество испаряющегося цинка, начиная с какой-то толщины, не зависит от толщины пластин, а зависит только от толщины защитного цинкового покрытия  $\delta_{оц}$ .

Учитывая, что ПДК оксида цинка равна  $0,5 \text{ мг/м}^3$ , даже одна точка контактного шва уже опасна для здоровья сварщика.

При необходимости сварки оцинкованных деталей обязательно нужно снимать цинковый слой механически или химически, или использовать мощную местную вентиляцию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для защиты металла от коррозии часто используется цинкование, среди достоинств которого можно отметить достаточно недорогую стоимость и хорошие показатели эффективности.

Однако, при проведении сварочных работ с такими материалами возможно выделение крайне вредных веществ для организма человека. В ходе исследования было определено количество выделяемых вредных веществ при сварке деталей с защитным покрытием.

При анализе литературных данных не удалось найти точное значение концентрации паров цинка, только лишь отмечается их вредное воздействие на организм человека. Вопрос о предельно допустимой концентрации паров цинка остается открытым. В дальнейшем планируются работы именно в данной области.

Надежными способами избежать отравления являются совершенствование средств индивидуальной защиты и постоянное их применение при работе с цинком, обучение сварщиков работе с ними, а также создание грамотной искусственной вентиляции на производстве и частое проветривание помещений.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

## CONFLICT OF INTERESTS:

*The authors declare no conflict of interests.*

## Список литературы:

1. Косарев В.В., Бабанов С.А. (2011). *Профессиональные болезни: учеб. пособие*. М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М.
2. Смусин Я.С., Бережной Р.В., Томилин В.В., Ширинский П.П. (1980). *Руководство по судебно-медицинской экспертизе отравлений*. М.: Медицина.
3. Райский М.И. (1953). *Судебная медицина*. М.: Медгиз.
4. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
5. Козловский С.Н. (2003). *Основы теории и технологии контактной точечной сварки: Монография*. Красноярск: СибГАУ.
6. Рыкалин Н.Н. (1951). *Расчеты тепловых процессов при сварке*. М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы.

## References:

1. Kosarev, V.V. & Babanov, S.A. (2011). *Occupational diseases: textbook*. M.: University textbook: INFRA-M (in Russ.).
2. Smusin, Ya.S., Berezhnoy, R.V., Tomilin, V.V. & Shirinsky, P.P. (1980). *Manual on forensic medical examination of poisoning*. M.: Medicine (in Russ).
3. Raisky, M.I. (1953). *Forensic medicine*. M.: Medgiz (in Russ).
4. GOST (State Standard) 12.1.005-88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air (in Russ).

5. Kozlovsky S.N. (2003). *Fundamentals of theory and technology of contact spot welding*: Monograph. Krasnoyarsk: SibGAU, (in Russ).
6. Rykalin, N.N. (1951). *Calculations of thermal processes during welding*. M.: State Scientific and Technical Publishing House of Engineering Literature (in Russ).