

УДК 621.791.01

С. К. Павлюк, д-р техн. наук, проф., А. В. Лупачёв

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ТОКОВ ПАРЫ ЭЛЕКТРОДОВ, ПОКРЫТЫХ ТОНКИМ СЛОЕМ ЭЛЕКТРОЛИТА, И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КОРРОЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Приведены результаты исследований по определению гальванических токов, возникающих между участками, прилегающими к сварному шву, полученному дуговой сваркой плавящимся электродом в защитных газах или дуговой пайкой. Установлено, что наиболее высокой коррозионной стойкостью обладают сварные соединения, выполненные проволокой на основе алюминия. В соединениях с широкими швами происходит снижение плотности гальванических токов на границе шов – основной металл и замедляются процессы массопереноса в агрессивной среде.

### *Введение*

Использование в сварных конструкциях оцинкованных сталей повышает их долговечность за счет высокой коррозионной стойкости сталей с покрытием. Сварные и паяные соединения из таких сталей обладают высокой степенью химической, структурной, геометрической и механической неоднородностей, поэтому системы, включающие такие соединения, являются термодинамически – неустойчивыми. Коррозионные поражения могут концентрироваться на шве и в зоне термического влияния, что приводит к снижению долговечности конструкции.

При сварке оцинкованного металла по обеим сторонам шва есть участки с полностью разрушенным покрытием, а при пайке с использованием медного или алюминиевого припоя – участки с частично разрушенными [1].

Металл шва, металл зоны термического влияния и основной металл с цинковым покрытием существенно различаются по величине электродных потенциалов. В электролитах такие сложные системы, как электроположительный металл шва, металл участка с разрушенным покрытием и повышенным электродным потенциалом и цинковое покрытие с пониженным электродным потенциалом проявляют себя по-разному в зависимости от ширины соответствующих зон [2].

При малой ширине участка с разрушенным покрытием (до 3 мм) действует

механизм анодной защиты, а при большей ширине участка разрушения действие анодной защиты ослабляется или прекращается.

В связи с этим проведены исследования гальванических токов, возникающих между участками, прилегающими к сварным швам, которые выполнены дуговой сваркой плавящимся электродом в защитных газах или дуговой пайкой.

Исследования проведены для случаев, когда:

- 1) сварной стальной шов и участок основного металла с полностью разрушенным цинковым покрытием;
- 2) паяный шов на основе медного сплава;
- 3) паяный шов из сплава на основе алюминия.

Эти варианты охватывают все существующие в настоящее время технологии сварки и дуговой пайки с использованием электродного материала на основе стали, медного сплава и алюминиевого сплава. Дается предварительная оценка коррозионной стойкости таких соединений сравнением электродных потенциалов, различных участков сварных соединений, величин и плотности гальванических токов.

### *Методика исследований гальванических токов разнородных металлов в атмосферных условиях*

Особенностью коррозии сварных и паяных соединений на сталях с метал-

лическими покрытиями в атмосферных условиях является возникновение гальванических токов на поверхности разнородных металлов, покрытых тонким слоем электролита. Таким электролитом является тонкий слой влаги, всегда присутствующий в атмосфере.

Гальванические токи возникают из-за того, что металлы основы, покрытия и шва различаются по электрохимическим потенциалам. В некоторых случаях эти токи являются полезными, например, гальванические токи медленно разрушают анодные покрытия (Zn, Cd), электрохимически защищая стальную основу.

В других случаях, когда на поверхности имеется катодное покрытие (Cu, Ni, Cr) или шов имеет больший положительный потенциал, чем основной металл, токи могут усилить коррозию основного металла [3–5].

Современные методы дуговой сварки и пайки предполагают использование электродных проволок на основе стали (Св08, Св08Г2С), меди (КМц-3-1, БрА9, БрК3), алюминия (АК-5). Рядом со швом

на основе стали есть участок с поврежденным или разрушенным покрытием.

Исследуется модель, состоящая из двух разнородных электродов, лежащих в одной плоскости, приведенных в соприкосновение и покрытых тонким слоем электролита, т. е. имитируются атмосферные условия, при которых на поверхности металла всегда имеется слой атмосферной влаги.

В модели учтено, что рядом со швом на основе медного сплава есть участок с поврежденным покрытием, а рядом со швом на основе алюминия — участок с незначительными следами повреждения.

В паре Fe–Zn анодом будет цинк, а катодом – сталь; в паре Cu–Fe анодом является сталь, а катодом – медь; в паре Cu–Zn анод – цинк, а катод – медь; в паре Al–Zn анодом является алюминий, а катодом – цинк.

На рис. 1 показана расчетная модель двухэлектродной системы, иллюстрирующая принцип исследования распределения гальванических токов.

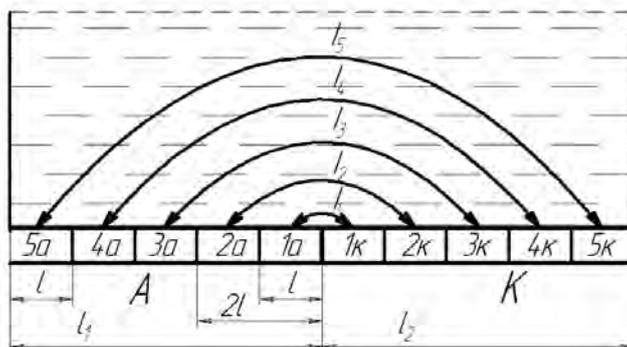


Рис. 1. Модель двухэлектродной системы для исследования распределения гальванических токов

Расчетная модель состоит из двух пластин разнородных металлов, приведенных в соприкосновение между участками 1а и 1к, покрытыми тонким слоем электролита. На поверхности пластин возникают гальванические токи, указанные стрелками (см. рис. 1). Слева располагается металл с более электроотрицательным

электродным потенциалом, который является анодом. Металл, показанный справа, – катод. Для исследования гальванических токов пластины разделены на участки, которые имеют размеры много меньше их ширины.

В соединении плотность тока на поверхности определяется удаленностью

от места контакта. Сила тока между электродами определяется из выражения [3]

$$I = \frac{\varphi_K^0 - \varphi_A^0}{\beta \frac{(l_1 - l_2)\rho}{2n\delta} + \frac{n}{l_2} K_1 + \frac{n}{l_1} K_2}, \quad (1)$$

где  $\varphi_K^0$ ,  $\varphi_A^0$  – стандартные электродные потенциалы катода и анода, В;  $\beta$  – коэффициент, определяемый удаленностью пары от места контакта (для первой пары электродов  $\beta = 1$ , для второй пары  $\beta = 3$ , для

третьей  $\beta = 5$ , для четвертой  $\beta = 7$  и т. д.);  $l_1$  – длина анода, м;  $l_2$  – длина катода, м;  $\rho$  – удельное сопротивление электролита, Ом·м;  $\delta$  – толщина слоя электролита, м;  $K$  – поляризационная характеристика элемента, В/А;  $n$  – число участков.

В расчетах используются величины электродных потенциалов и коэффициентов поляризации, приведенные в табл. 1.

Табл. 1. Электродные потенциалы и коэффициенты поляризации

Показатель	Химический элемент			
	Al	Zn	Fe	Cu
$\varphi^0$ , В	-1,66	-0,76	-0,43	+0,337
K, В/А	1000	0	0	1000

*Примечание* – Для всех условий приняты следующие значения:  $\rho = 10100$  Ом·м;  $l_K = 0,03$  м;  $l_A = 0,03$  м;  $l = 0,006$  м – протяженность участка, прилегающего к месту контакта и расположенного на расстоянии  $l_1/n$ ;  $n = 5$ , толщина слоя электролита (влаги)  $\delta = 10$  мкм.

Длина участков повреждения покрытия и ширины шва принята различной [6]. При моделировании шва установлены следующие условия: в паре Fe–Zn:  $l_K = 0,004$  м;

$l_A = 0,05$  м; в паре Cu–Fe:  $l_K = 0,005$  м;  $l_A = 0,004$  м; в паре Cu–Zn:  $l_K = 0,005$  м;  $l_A = 0,05$  м; в паре Al–Zn:  $l_K = 0,05$  м;  $l_A = 0,005$  м.

#### **Распределение гальванических токов в разнородных соединениях**

Рассчитаны разности электродных потенциалов для различных вариантов построения технологии соединения. Эти значения представлены в табл. 2.

Табл. 2. Разности электродных потенциалов в парах разнородных металлов

Показатель	Гальваническая пара			
	Fe–Zn	Cu–Fe	Cu–Zn	Al–Zn
Разность электродных потенциалов E, В	0,33	0,767	1,097	0,9

Из табл. 2 следует, что в случае обеспечения анодной защиты между двумя разнородными металлами Zn–Fe достаточна разность электродных потенциалов, равная 0,33 В. Большие значения электродных потенциалов будут свидетельствовать об интенсификации перехода в раствор металла с более отрицательным электродным потенциалом.

В частности, в соединениях со швом на основе меди возможно интенсивное растворение железа на поврежденном при пайке участке и растворение цинка рядом с этим участком.

Использование в качестве припоя алюминиевого сплава способствует то-

му, что у границы шва на узком участке происходит лишь незначительное испарения цинкового покрытия. В результате гальванические токи возникают только между швом из алюминиевого сплава и поверхностью цинкового покрытия. Разница электродных потенциалов в этом случае относительно небольшая (0,9 В), поэтому процесс коррозии не будет интенсивный.

Гальванические токи распределяются по участкам, причем с увеличением расстояния расположения участка от зоны

контакта величина гальванического тока снижается.

Расчеты, подтверждающие небольшие величины токов в соединениях, паяных припоем на основе алюминия, свидетельствуют о большей коррозионной опасности для швов, паяных сплавами на основе меди.

Значения гальванических токов между разнородными металлами с учетом расстояния от границы контакта показаны в табл. 3.

Табл. 3. Гальванические токи между разнородными металлами

Расстояние от границы контакта, мм	Гальваническая пара металлов			
	Fe-Zn	Cu-Fe	Cu-Zn	Al-Zn
	Гальванический ток I, мкА			
6	0,054	0,123	0,176	0,145
12	0,0182	0,042	0,06	0,05
18	0,011	0,0252	0,036	0,03
24	0,0078	0,018	0,026	0,021
30	0,0061	0,014	0,02	0,016

В элементах с электродами, лежащими в одной плоскости, значения гальванических токов на различных участках существенно отличаются. Практически весь ток сосредотачивается на участках, находящихся на расстоянии не более 5–6 мм от границы контакта.

Расчеты плотностей тока выполнены для пар разнородных металлов, Fe-Zn, Cu-Fe, Cu-Zn, Al-Zn, покрытых тонким слоем электролита.

Исходя из полученных значений силы тока плотность тока определяется из выражения [3]

$$i_A = \frac{I \cdot n}{l_1}; \quad i_K = \frac{I \cdot n}{l_2}, \quad (2)$$

где  $I$  – сила тока, А;  $n$  – число участков;  $l_1$  – длина анода, м;  $l_2$  – длина катода, м.

На рис. 2 показано распределение плотности гальванического тока при кон-

тактах двух разнородных металлов в атмосферных условиях.

Для получения более точных и достоверных результатов исследование гальванических токов в стыке двух разнородных металлов дополнено исследованиями моделей, имитирующих сварные и паяные швы. Этот случай отличается от предыдущего тем, что учтена ограниченная протяженность отдельных участков: шва и участка повреждения покрытия.

Для сравнительного анализа проведены расчеты электрохимических процессов, протекающих на поверхности сварного и паяного соединения, покрытого тонким слоем электролита, при условии, что ширина стальной, медной и алюминиевой пластин меньше ширины пластины оцинкованной стали, что соответствует ширине сварного и паяного швов, и возможно выгорание цин-

кового покрытия на стали.

В случае сварки оцинкованного металла электродной проволокой на основе стали, цинковое покрытие повреждается и

гальваническая пара возникает между стальным швом, основным металлом (сталью) без покрытия и цинковым покрытием.

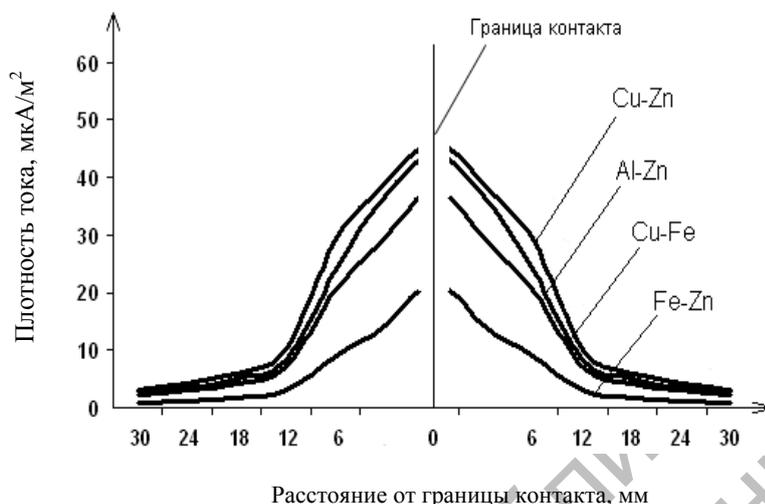


Рис. 2. Распределение плотности тока при контакте двух разнородных металлов

Если использовалась сварочная проволока на основе медного сплава и цинковое покрытие частично повреждено вблизи шва, то гальванические токи возникают между медным швом и сталью.

Если покрытие на оцинкованной стали вблизи шва сохраняется, то гальваническая пара возникает между швом и покрытием. Рассмотрен случай дуговой пайки оцинкованной стали сварочной проволокой на основе медного сплава при

условии, что цинковое покрытие не выгорает.

При пайке оцинкованной стали проволокой на основе алюминиевого сплава цинковое покрытие не выгорает. Гальваническая пара возникает между швом и покрытием.

Результаты расчета гальванических токов, протекающих на поверхности шва, покрытого тонким слоем электролита, представлены в табл. 4.

Табл. 4. Гальванические токи, протекающие на поверхности шва

Пара металлов	Участок металла (рис. 1)				
	1а-1к	2а-2к	3а-3к	4а-4к	5а-5к
	Гальванический ток I, мкА				
Fe-Zn	0,0554	0,0185	0,012	0,0079	0,0062
Cu-Fe	0,4	0,206	0,14	0,1042	0,0464
Cu-Zn	0,1674	0,0621	0,038	0,0275	0,0215
Al-Zn	0,137	0,051	0,0313	0,0226	0,018

При контакте двух разнородных металлов – шва, околшовной зоны Fe и покрытия Zn, значения гальванических токов на различных участках отличаются. Наибольшие значения приходятся на участки, расположенные вблизи границы контакта разнородных металлов. Разница между значениями на ближайшем к месту контакта участке и наиболее удаленном составляет 86,28 % от максимального значения гальванического тока. На рис. 3 представлено распределение плотности

тока при контакте двух разнородных металлов: шва и основного металла Fe и защитного покрытия Zn.

Распределение плотности тока при контакте Cu–Fe имеет несколько иной характер. Это связано с отличной от случая Fe–Zn шириной шва и поврежденного защитного покрытия. На рис. 4 представлено распределение плотности тока при контакте двух разнородных металлов шва Cu и основного металла Fe.

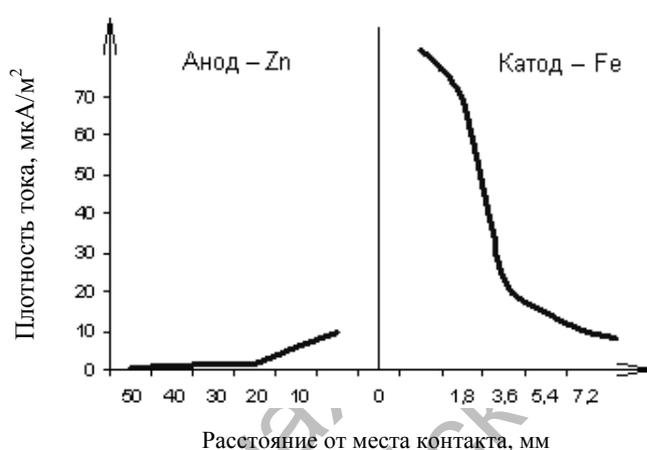


Рис. 3. Распределение плотности тока при контакте двух разнородных металлов: основного (цинка) и металла шва (железа)

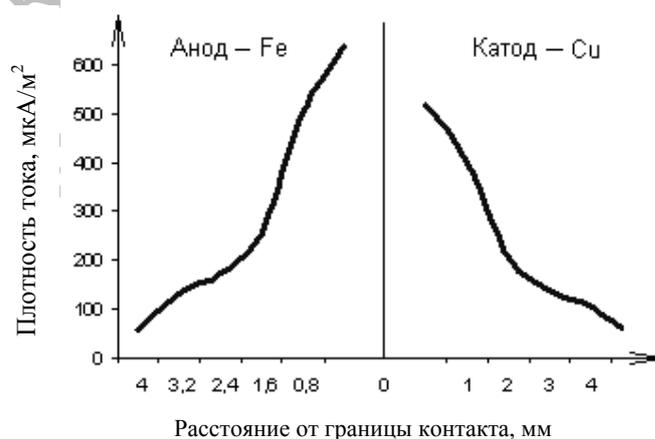


Рис. 4. Распределение плотности тока при контакте двух разнородных металлов: основного металла (железа) и металла шва (меди)

Распределение плотности гальванического тока при контакте Cu–Zn имеет схожий характер с распределением плотности тока при контакте Fe–Zn. Различие лишь в абсолютных значениях плотностей токов. На рис. 5 представлено распределение плотности тока при контакте двух разнородных металлов: шва на основе медного сплава и цинкового покрытия.

Из графиков следует, что характер распределения плотности тока одинаков.

Максимальные значения плотности тока приходятся на участки, непосредственно прилегающие к месту контакта электродов. Из графиков также видно, что по мере удаления от границы контакта электродов плотность тока падает.

На рис. 6 представлено распределение плотности тока при контакте двух разнородных металлов: шва на основе алюминия и цинкового покрытия.

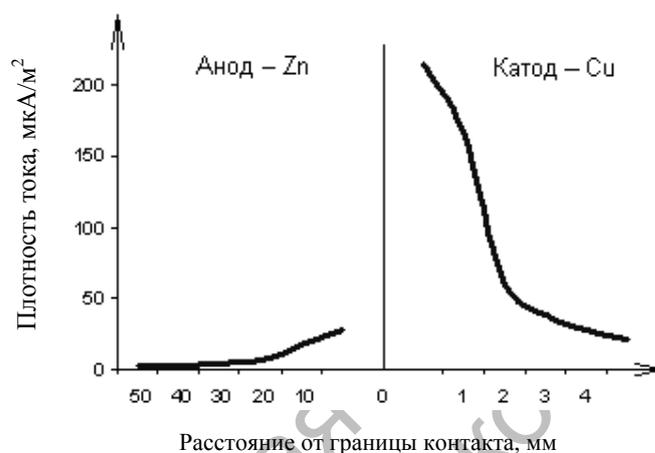


Рис. 5. Распределение плотности тока при контакте разнородных металлов: цинкового покрытия и медного сплава

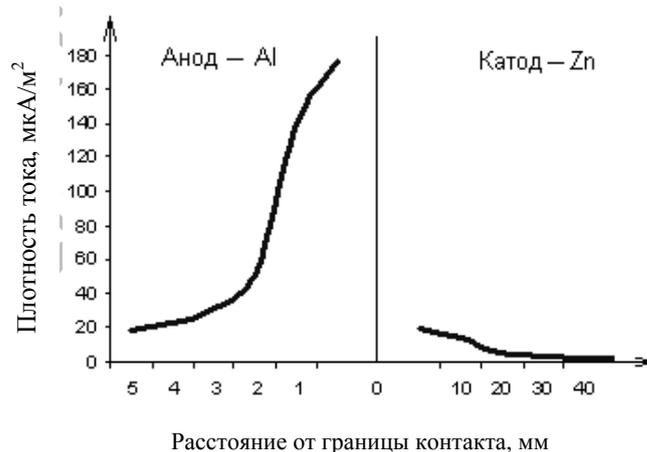


Рис. 6. Распределение плотности тока при контакте шва на основе алюминия и цинкового покрытия

Различие существует лишь в абсолютном значении токов, причем на близком расстоянии от границы контакта электродов практически весь ток сосредоточен на участках, находящихся на расстоянии 4–6 мм от границы контакта.

Максимальные значения плотности тока приходятся на участки, непосредственно прилегающие к месту контакта электродов. Из графиков также видно, что по мере удаления от границы контакта электродов плотность тока падает.

Таким образом, влияние разнородных контактов на коррозию анодного металла в тонких слоях электролитов сказывается в узкой зоне, не превышающей 5–7 мм. Вне этой зоны металлы подвергаются коррозии как бы в отсутствие контакта.

### **Обсуждение результатов**

Ограниченная ширина участков самого шва и участков поврежденного покрытия не изменяет общей картины распределения гальванических токов для контакта разнородных металлов, но при этом появляются существенные особенности. Основная особенность состоит в том, что изменяются величины плотности гальванических токов, что обусловлено ограничением площадей их протекания. Так, значения плотности гальванического тока на поверхности разнородных пластин Fe–Zn на расстоянии 1 мм от границы контакта на аноде составляет  $8,43 \text{ мкА/м}^2$ , а на поверхности шва –  $82 \text{ мкА/м}^2$ .

Локальная неоднородность сварного соединения может существенно ускорить коррозионное повреждение. Ширина сварного шва является параметром, которым можно управлять в допустимых стандартах пределах за счет изменения режимов сварки и пайки. Из исследований следует, что для случая шва на основе стали или меди желательно приближать ширину шва к максимальному значению, допустимому стандартом, поскольку в таком случае происходит растекание гальванических токов по большей площади, снижая плотность тока у краев шва и защитного покрытия.

Данное положение касается швов на основе алюминия в меньшей степени, т. к. плотность гальванического тока в зоне контакта Al–Zn не велика по сравнению с плотностями токов, возникающих на поверхности пар Fe–Zn, Cu–Fe, Cu–Zn.

Низкая температура плавления алюминиевого сплава ( $625 \text{ }^\circ\text{C}$ ) способствует тому, что у границы шва на узком участке происходит лишь незначительное испарение цинкового покрытия. В этом случае

ожидается повышение коррозионной стойкости паяных соединений в электролитах. При контакте расплавленного алюминия со сталью возможно образование хрупких интерметаллических соединений, преимущественно  $\text{Fe}_3\text{Al}$ . Конструкция паяного соединения должна быть такой, чтобы жидкий алюминий контактировал только с цинком, например шов, расположенный на стороне, обратной отбортовке.

В случаях повреждения защитного покрытия на стали при заготовительных или других операциях желательно наносить слой цинка напылением, гальваническим или иными способами.

При экспериментальных исследованиях необходимо учитывать состав и свойства рабочей атмосферы, а также подбирать технологию сварки или пайки в соответствии с характером условий эксплуатации [6].

### **Заключение**

Проведенные исследования дают оценку коррозионной стойкости сварных и паяных соединений, эксплуатируемых на открытом воздухе. Образующиеся несплошности в цинковом покрытии, вызванные его разрушением в процессе нагрева при сварке или пайке, интенсифицируют коррозию стального сварного шва и зоны термического влияния, поэтому низкая коррозионная стойкость ожидается у сварных соединений, выполненных покрытыми стальными электродами или сваркой в защитных газах проволокой Св–08Г2С.

Использование дуговой пайки со швом из медного сплава не только не решает задачу защиты стали от коррозии, но, возможно, усугубляет ее по причине высокой разности электродных потенциалов и больших гальванических токов в зоне термического влияния, вследствие чего процесс разрушения цинкового покрытия может ускоряться. Конечный результат зависит от поляризационных процессов, определяемых составом влажной атмосферы (сельская,

городская, промышленная, морская).

Наиболее высокой коррозионной стойкостью обладают соединения, полученные с использованием электродов и проволок на основе алюминия. Электродные потенциалы в сварных соединениях, выполненных по системе «алюминиевый сплав – цинковое покрытие» невелики, поэтому возникающие гальванические токи существенно ниже по сравнению с соединениями, выполненными электродами или проволокой на основе стали или медного сплава.

При выполнении швов с шириной по верхнему пределу стандарта происходит снижение плотности гальванических токов на границе «шов – основной металл», что приводит к замедлению процессов массопереноса в агрессивной среде.

Отсутствие точных сведений о коэффициентах поляризации позволило отразить только качественную характеристику поведения соединения разнородных металлов в агрессивных средах. Для получения количественных оценок необходимы экспериментальные исследования механизмов разрушения и коррозионной стойкости соединений на образцах в кон-

кретных агрессивных средах.

Результаты данных исследований должны учитываться при проектировании технологических процессов сварки и пайки сталей с анодными покрытиями (Zn, Cd).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлюк, С. К. Закономерности процесса повреждения и разрушения цинкового покрытия на стали при сварке плавлением и луговой пайке / С. К. Павлюк, А. В. Лупачёв, Ю. А. Цумарев // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 2. – С. 76–84.
2. Розенфельд, И. Л. Атмосферная коррозия металлов / И. Л. Розенфельд. – М. : Машиностроение, 1960. – 362 с.
3. Розенфельд, И. Л. Коррозия и защита металлов / И. Л. Розенфельд. – М. : Металлургия, 1969. – 448 с.
4. Акимов, Г. В. Основы учения о коррозии и защите металлов / Г. В. Акимов. – М. : Металлургия, 1946. – 420 с.
5. Томашов, Н. Д. Теория коррозии и защита металлов / Н. Д. Томашов. – М. : Металлургия, 1963. – 168 с.
6. Емелин, М. И. Защита машин от коррозии в условиях эксплуатации / М. И. Емелин, А. А. Герасименко. – М. : Машиностроение, 1980. – 192 с.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 23.06.2008

**S. K. Pavluk, A. V. Lupachev**  
**Research of galvanic currents of electrode pairs, covered with a thin electrolyte layer and their influence on corrosion processes in welded joints**

The article gives results of research on galvanic current determination appearing between areas adjoining to the welded joint at consumable-electrode arc welding in an atmosphere of shielding gas or arc soldering. It has been found out that welded joints made with wire based on aluminum have the highest corrosion resistance. In thick joints density of galvanic currents reduces in joint-base metal area and mass carrying processes slow down in corrosive medium.