

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ И ПЛЁНКИ

PACS numbers: 44.10.+i, 68.08.-p, 68.35.Np, 68.47.-b, 81.15.Gh, 81.16.Pr, 81.65.Mq

Влияние поверхностных оксидов на механизм сцепления покрытия при плазменном напылении

С. В. Лоскутов, А. В. Ершов, Е. А. Зеленина

*Запорожский национальный технический университет,
ул. Жуковского, 64,
69063 Запорожье, Украина*

Показано, что присутствие оксидного слоя на обрабатываемой поверхности при нанесении плазменных покрытий оказывает значительное влияние на контактную температуру и механизм сцепления частиц покрытия с поверхностью подложки. Исследован процесс контактного нагрева слоя поверхностных оксидов. Показана возможность сцепления частиц покрытия со слоем поверхностных оксидов при обеспечении смачивания за счёт плавления оксидного слоя. Определены условия смачиваемого контакта покрытия при нестационарном теплообмене в зависимости от теплофизических свойств контактной пары и температур частиц покрытия и подложки. Выполнена оценка времени смачивания для измеренной толщины оксидного слоя в зависимости от температуры частиц покрытия.

Ключевые слова: прочность сцепления, когезионная прочность, смачивание, химическое взаимодействие, нестационарный теплообмен.

Показано, що присутність оксидного шару на оброблюваній поверхні при нанесенні плазмових покриттів чинить значний вплив на контактну температуру та механізм зчеплення частинок покриття з поверхнею підложки. Досліджено процес контактного нагріву шару поверхневих оксидів. Показано можливість зчеплення частинок покриття з шаром поверхневих оксидів при забезпеченні змочування за рахунок топлення оксидного ша-

Corresponding author: Stephan Vasiljevich Loskutov
E-mail: svl@zntu.edu.ua

*Zaporizhzhya National Technical University,
64 Zhukovsky Str., 69063 Zaporizhzhya, Ukraine*

Please cite this article as: S. V. Loskutov, A. V. Yershov, and E. A. Zelenina, Influence of Surface Oxides on the Mechanism of Adhesion of a Coating at Plasma Spraying, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 6: 839–851 (2016) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.38.06.0839.

ру. Визначено умови змочування контакту покриття при нестационарному теплообміні залежно від теплофізичних властивостей контактної пари та температур частинок покриття і підложжя. Виконано оцінку часу змочування для вимірної товщини оксидного шару залежно від температури частинок покриття.

Ключові слова: міцність зчеплення, когезійна міцність, змочування, хімічна взаємодія, нестационарний теплообмін.

As shown, the presence of the oxide layer on the treated surface during application of plasma coatings has a significant influence on the contact temperature and the mechanism of adhesion of the coating particles with the substrate surface. The process of contact heating of the layer of surface oxides is investigated. The possibility of adhesion of the coating particles with the layer of surface oxides while ensuring wetting due to the melting of the oxide layer is shown. The conditions of wet contact of the coating particles at unsteady heat transfer are determined depending on thermophysical properties of contact pair and temperatures of coating particles and substrate. The time of wetting for the measured thickness of the oxide layer is estimated depending on the temperature of coating particles.

Key words: adhesion strength, cohesive strength, wetting, chemical interaction, unsteady heat transfer.

(Получено 17 февраля 2016 г.; окончат. вариант — 16 апреля 2016 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Плазменные покрытия относятся к эффективным ресурсо- и энергосберегающим технологиям и используются в различных областях науки и техники, как при создании новых изделий, так и при реставрации поверхностей. Технология плазменного напыления используется, например, для восстановления размеров рабочих поверхностей коленчатых и распределительных валов двигателей автомобилей, комбайнов, тепловозов и других машин. Многократно восстанавливают поверхности с износом на величину 0,6–1,2 мм. При этом затраты на восстановление в 8–10 раз меньше стоимости новых деталей. Важнейшей характеристикой плазмонанпыленного покрытия является прочность сцепления покрытия с поверхностью. В настоящее время уровень прочности сцепления и когезионной прочности покрытий, которые наносятся в атмосферных условиях путём распыления токоведущей проволоки, составляют только 10–15% от прочности компактного материала [1]. Значительное влияние на снижение прочности сцепления оказывают поверхностные оксиды в контактной зоне. Исследования микрошлифов покрытий показывают наличие оксидного слоя вокруг каждой частицы покрытия. Защитный слой оксидов имеет сложное строение,

снаружи располагаются продукты полного окисления — гематит (Fe_2O_3), затем слой магнетита или хромистой шпинели (Fe_3O_4 или FeCrO_4), ближе к металлу при высоких температурах располагается слой вюстита FeO . Вюстит может отсутствовать при относительно низких температурах поверхности металла. Подоксидные слои металла могут обедняться углеродом и хромом. Иногда по границам зёрен в поверхностном слое наблюдается избирательная коррозия. Наибольшая толщина оксидного слоя наблюдается в контакте между покрытием и подложкой [2]. Отсюда следует, что прочность сцепления покрытия зависит от прочности сцепления с промежуточным слоем оксидов в зонах контакта. Поэтому актуальным является исследование физических механизмов сцепления покрытия с металлической поверхностью при наличии на ней оксидной плёнки.

Существующая модель прочности сцепления плазменных покрытий основана на протекании процесса химического взаимодействия между поверхностями в зоне физического контакта [1]. При исследовании этой проблемы следует учитывать условия смачивания поверхности при наличии на ней оксидного слоя. Сложность задачи заключается в том, что плёнка твёрдых поверхностных оксидов не смачивается жидким металлом, [3] и поэтому физический контакт покрытия и подложки отсутствует. При отсутствии смачивания поверхностных оксидов металлом покрытия, частицы будут отскакивать от подложки при формировании покрытия.

Одним из условий смачивания является плавление поверхностных оксидов в зоне контакта с частицей покрытия [3]. Прочность сцепления в зоне оплавленного контакта обусловлена прочностью оксидной плёнки. Значения температуры плавления оксидов железа приведены в табл. 1.

В поверхностный оксидный слой входят вюстит и магнетит. Температура плавления магнетита достаточно высока и превосходит температуру плавления стали. При нанесении стальных покрытий на стальную подложку контактная температура по оценкам [1] составляет $850\text{--}900^\circ\text{C}$, что почти вдвое ниже температуры смачивания оксидов. Обнаруженное противоречие требует уточнения модели расчёта контактной температуры, которая определяет условия смачивания поверхностных оксидов.

По нашему мнению, существующие модели расчётов контактной температуры не учитывают два важных момента:

- отсутствие точных измерений температур частиц покрытия в струе плазмы, которая использовалась в качестве параметра для расчёта контактной температуры;
- наличие оксидного слоя на подложке, теплопроводность которого значительно ниже теплопроводности стальной основы.

Согласно последним измерениям [4], температура частиц покры-

ТАБЛИЦА 1. Температура плавления оксидов железа.**TABLE 1.** The melting temperature of iron oxides.

Оксиды железа	$T_{пл}$, К [5]	$t_{пл}$, °С
Вюстит, FeO	1647	1374
Магнетит, Fe ₃ O ₄	1867	1594
Гематит, Fe ₂ O ₃	1838	1565

тия при распылении токоведущей стальной проволоки в струе плазмы достигает температуры кипения стали. Однако даже при этом условии при расчёте контактной температуры не достигается температура плавления оксидов. Поэтому для уточнения условий смачивания частиц с подложкой требуется разработка модели расчёта контактной температуры при наличии оксидного слоя на подложке, теплопроводность которого значительно ниже теплопроводности стальной основы.

Таким образом, физические закономерности сцепления плазменных покрытий связаны с определением условий смачивания подложки при наличии поверхностных оксидов. Наиболее важным условием смачивания является уровень контактной температуры. Поэтому целью работы является разработка модели расчёта контактной температуры при наличии оксидного слоя на подложке, для определения условий смачивания поверхностных оксидов при нанесении плазменного покрытия на стальную подложку в воздушной среде.

2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНТАКТА

На поверхности стальной подложки в воздухе образуется магнетит — Fe₃O₄, который имеет ориентационное кристаллографическое соответствие с зёрнами подокисного слоя металла. Структура кристаллов и параметры решётки железа и магнетита благоприятны для направленного роста слоя окислов. С утолщением слоя магнетита при дальнейшем окислении ориентационное соответствие ослабляется. Непосредственно на металле находится тонкий, прочно сцепленный с ним сплошной слой Fe₃O₄, обеспечивающий защиту металла. Оба слоя магнетита имеют кристаллическое строение. Первый, плотный слой образуется из более мелких кристаллов, чем второй, рыхлый слой.

Сцепление покрытия с оксидным слоем зависит от уровня контактной температуры. Для оценки контактной температуры используют модель неподвижного контакта частиц с подложкой [1]. При этом уровень контактной температуры оказывается значи-

тельно ниже температуры плавления подложки. Однако полученные оценки не учитывают возможность перегрева напыляемых частиц значительно выше температуры плавления. Например, в [4] показано, что при распылении проволоки-анода в плазмотроне температура частиц покрытия достигает температуры кипения, а не плавления металла, как предполагалось в [1].

Рассмотрим нагрев подложки под действием теплового потока, поступающего в подложку при контакте с жидкой частицей. Для расчёта температурного поля используется уравнение нестационарной теплопроводности [5]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где t — температура подложки, зависящая от времени нагрева τ и координаты x , направленной вглубь подложки, $\alpha = \lambda/(\rho c)$ — коэффициент температуропроводности, определяемый величинами теплопроводности λ , плотности ρ и теплоёмкости подложки c .

Зададим начальные и граничные условия для плоской полуограниченной поверхности подложки с начальной температурой t_2 :

$$\tau = 0: t_2 = \text{const}, \quad (2)$$

$$\tau > 0: x = 0: t = t_k,$$

$$x \rightarrow \infty: \frac{\partial t}{\partial x} = 0; t = t_2, \quad (3)$$

где t_k — температура в контакте подложки и частицы покрытия.

Решение уравнения (1) можно представить в виде [4] (задача 1):

$$t - t_2 = \theta(t_k - t_2), \quad (4)$$

где θ — параметр температуры, который выражается через интеграл ошибок

$$\theta = 1 - \operatorname{erfc} \frac{1}{2\sqrt{F_0}}, \quad (5)$$

где величина

$$F_0 = \alpha\tau/x^2 \quad (6)$$

представляет критерий Фурье, который равен квадрату отношения длины распространения тепловой волны к координате, отсчитываемой от поверхности подложки. Плотность теплового потока в зоне контакта определится согласно [5]:

$$q_2 = -\lambda_2 \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\lambda_2(t_k - t_2)}{\sqrt{\pi a_2 \tau}}. \quad (7)$$

Аналогично формуле (7) определится и плотность теплового потока в частице покрытия

$$q_1 = -\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{\lambda_1(t_1 - t_k)}{\sqrt{\pi a_1 \tau}}. \quad (8)$$

Здесь и ниже теплофизические коэффициенты подложки обозначаются индексом 2, коэффициенты частицы покрытия — индексом 1, а коэффициенты оксидного слоя — индексом 0. Из формул (7) и (8) следует, что зона температурного поля или длина тепловой волны в частице покрытия и в металле подложки определяются формулами

$$\delta_i = \sqrt{\pi a_i \tau}. \quad (9)$$

На поверхности подложки, при $x = 0$, температура нагрева под действием теплового потока q_1 будет равна контактной температуре, величина которой определится при равенстве формул (7) и (8), поскольку плотность теплового потока в зоне контакта полуграниченных тел не изменяется [5]:

$$t_k = \frac{t_1 + t_2 \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2 / (\rho_1 c_1 \lambda_1)}}{1 + \sqrt{\rho_2 c_2 \lambda_2 / (\rho_1 c_1 \lambda_1)}}. \quad (10)$$

Приведённую формулу можно применить для определения контактной температуры покрытия с оксидным слоем подложки в течение времени прохождения тепловой волны через слой оксида. Однако, при выходе тепловой волны в металл подложки, будет происходить изменение контактной температуры вследствие отличия между теплофизическими свойствами металла и оксида. Как видно из формулы (10), контактная температура будет уменьшаться при относительном возрастании плотности, теплоёмкости и теплопроводности подложки.

Для расчёта зависимости контактной температуры подложки со слоем оксида от времени контакта, выполним анализ формулы (7) для теплового потока в однородной среде. Величина

$$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2}$$

представляет тепловое сопротивление для единичной площадки контакта однородной подложки. Аналогично определится тепловое

сопротивление для слоя поверхностных оксидов толщиной δ_0 и теплопроводностью λ_0

$$R_0 = \frac{\delta_0}{\lambda_0}.$$

Полная длина тепловой волны в слое оксида и металле подложки определяется с учётом времени запаздывания τ_0 , которое равно времени прохождения тепловой волны через слой оксида

$$\delta_2 = \sqrt{\pi(a_0\tau_0 + a_2(\tau - \tau_0))}. \quad (11)$$

Время запаздывания τ_0 зависит от толщины слоя оксида

$$\tau_0 = \frac{\delta_0^2}{\pi a_0}.$$

При этом квадрат полной длины тепловой волны равен сумме квадратов длин составляющих участков волны. Схема распределения температуры в момент контакта частицы покрытия с оксидной подложкой показана на рис. 1.

Как видно на рис. 1, присутствие слоя оксида толщиной δ_0 на

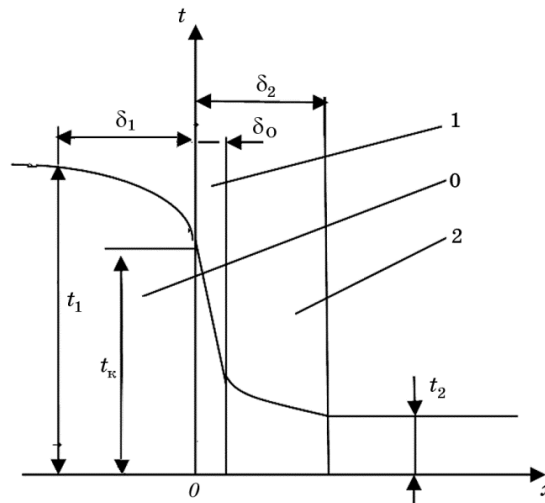


Рис. 1. Схема распределения температуры в частице покрытия в слое оксида толщиной δ_0 и в металле подложки в момент контакта. Обозначения: 0 — слой оксида, 1 — частица покрытия, 2 — металл подложки.

Fig. 1. The scheme of the temperature distribution in the particle coating of the oxide layer with thickness δ_0 and in the metal substrate at the time of contact. Legend: 0—oxide layer, 1—particle of coating, 2—metal of substrate.

подложке приводит к повышению контактной температуры t_k .

Тепловое сопротивление подложки со слоем оксида находится аналогично длине тепловой волны и определится в соответствии с условием: квадрат сопротивления подложки со слоем оксида равен сумме квадратов тепловых сопротивлений оксида и подоксидного слоя —

$$R_{O_2} = \sqrt{\frac{\pi a_0 \tau_0}{\lambda_0^2} + \frac{\pi a_2 (\tau - \tau_0)}{\lambda_2^2}}. \quad (12)$$

При идентичности теплофизических характеристик оксида и металла подложки, формула (12) совпадает с формулой для теплового сопротивления однородной подложки. Тогда формула (7) для теплового потока подложки со слоем оксида примет вид

$$q_2 = -\frac{t_k - t_2}{R_{O_2}}. \quad (13)$$

Сравнивая (13) с плотностью теплового потока частицы покрытия (8), находим формулу для контактной температуры в виде

$$t_k = \frac{t_1 + t_2 B}{1 + B}, \quad (14)$$

где B — отношение тепловых сопротивлений частицы покрытия и подложки со слоем оксида. Учитывая зависимости δ_1 и R_{20} от времени согласно (9) и (12), получим формулу для B в зависимости от времени контакта τ , при $\tau > \tau_0$

$$B = \frac{\delta_1 / \lambda_1}{R_{O_2}} = \frac{\sqrt{\tau / (\rho_1 c_1 \lambda_1)}}{\sqrt{\tau_0 / (\rho_0 c_0 \lambda_0) + (\tau - \tau_0) / (\rho_2 c_2 \lambda_2)}}. \quad (15)$$

Для начального момента контакта, при $\tau_0 > \tau$, толщина температурного слоя в подложке меньше толщины слоя оксида и формула (15) принимает вид

$$B = \frac{\sqrt{\rho_0 c_0 \lambda_0}}{\sqrt{\rho_1 c_1 \lambda_1}}.$$

При отсутствии оксидного слоя ($\delta_0 = 0$, $\tau_0 = 0$) или при идентичности его теплофизических свойств со свойствами подложки, подстановка формулы (15) в (14) приводит к формуле (10), что подтверждает достоверность использования (12) при определении теплового сопротивления подложки со слоем оксида. Формулы (14)–(15) дают зависимость изменения контактной температуры от времени контакта при $\tau > \tau_0$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При расчётах контактной температуры принималось, что температура нагрева частиц покрытия достигает температуры кипения [4]. Выполнены оценки контактной температуры при нанесении на стальную подложку покрытия из стали. Учтено, что значения теплофизических коэффициентов в твёрдом и жидком состояниях вблизи точки плавления [6] отличаются друг от друга, табл. 2. Например, плотность металла при плавлении снижается на 10%. Теплопроводность при этом уменьшается примерно в 2 раза. А теплоёмкость возрастает на 10–20%. Данные литературных источников отличаются друг от друга на 15–20%. Поэтому погрешность расчётов также близка к 20%. В таблице 2 приведены и теплофизические коэффициенты для оксида железа в твёрдом состоянии [7–9], которые показывают, что теплопроводность оксида в 3–4 раза меньше, чем у жидкой стали.

При расчёте контактной температуры учитывалось, что в начальный момент контакта частицы с подложкой существует небольшой интервал времени, когда тепловая волна распространяется внутри оксидного слоя. При этом контактная температура, определяемая формулой (14), будет значительно выше, чем при отсутствии оксидного слоя. Расчётная оценка контактной температуры при нанесении покрытия из наплавочной проволоки Нп-65Г (содержанием 0,65% углерода и 1% марганца) диаметром 1,4 мм на подложку из стали Ст5 и на подложку со слоем оксида в зависимости от начальной температуры подложки приведены в табл. 3. Представляет интерес величина контактной температуры на слое поверхностного оксида, которая значительно превышает температуру его плавления. Полученный результат объясняет появление смачивания поверхностных оксидов в момент сцепления с частицей покрытия.

Важной величиной является температура частиц покрытия, при

ТАБЛИЦА 2. Теплофизические коэффициенты для жидких частиц стального покрытия, а также для стальной подложки и оксидного слоя в твёрдом состоянии вблизи точки плавления.

TABLE 2. Thermophysical coefficients for liquid particles of steel coating and for the steel substrate, and for the oxide layer in the solid state near the melting point.

	ρ_t , кг/м ³	$\rho_{ж}$, кг/м ³	λ_t , Вт/м К	$\lambda_{ж}$, Вт/м К	c_t , Дж/кг·К	$c_{ж}$, Дж/кг·К	t_p , °С	$t_{кип}$, °С
Fe	7760	7000	29	17	662	710	1535	2735
Fe ₃ O ₄	5240		5		783		1594	

ТАБЛИЦА 3. Зависимость контактной температуры от начальной температуры подложки t_2 при $\tau_0 > \tau$ для частиц покрытия, нагретых до температуры кипения.

TABLE 3. The dependence of the contact temperature on initial temperature t_2 of substrate at the $\tau_0 > \tau$ for coating particles heated to boiling temperature.

	Покрытие	Подложка	$t_2, ^\circ\text{C}$			
			0	50	100	150
$t_k, ^\circ\text{C}$	Fe	Fe	1230	1257	1285	1312
	Fe	Fe ₃ O ₄	1830	1840	1853	1870

которой возникает явление смачивания подложки. Согласно расчёту, для смачивания подложки с начальной температурой 100°C , для оплавления оксидов необходим уровень температуры частиц покрытия выше 2330°C .

Для оценки времени существования наибольшей контактной температуры использовалась формула (16). Толщина слоя оксидов на подложке определялась с использованием фото микрошлифа поперечного сечения контакта покрытие–подложка (рис. 2). При толщине изображения оксидного слоя на фото — 2 мм, реальная толщина оксидного слоя составит 7 мкм. При коэффициенте температуропроводности оксида $\alpha = \lambda/\rho c = 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, время прохождения тепловой волны через её толщину, согласно (16), составит $3,4 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. В указанном интервале времени температура слоя оксидов будет постоянна и соответствует данным табл. 3. После этого интервала температурное поле распространится вглубь металла подложки, где теплопроводность выше. При этом контактная температура будет снижаться.

Таким образом, наличие оксидной плёнки на поверхности подложки приводит к повышению контактной температуры и плавлению оксида. При этом происходит смачивание оксидов подложки с частицами покрытия, которое необходимо для обеспечения физического контакта.

Изменение контактной температуры в зависимости от времени контакта приведено в табл. 4 для начальной температуры подложки 100°C , при температурах частиц покрытия 2735°C , 2500°C и 2330°C . Здесь же даны значения коэффициента B , определяющие отношение тепловых сопротивлений покрытия и подложки, согласно (15), которые используются в формуле (14) для определения зависимости контактной температуры от времени контакта. Из таблицы 4 видно, что при увеличении времени контакта коэффициент B возрастает. При этом влияние слоя поверхностных оксидов на тепловое сопротивление подложки уменьшается, и контактная температура снижается.

Температура частиц покрытия 2330°C служит граничной температурой плавления оксидов. Время существования жидкой фазы оксида при температурах частиц покрытия 2735°C составляет примерно 8 мкс. При этих условиях обеспечивается физический кон-

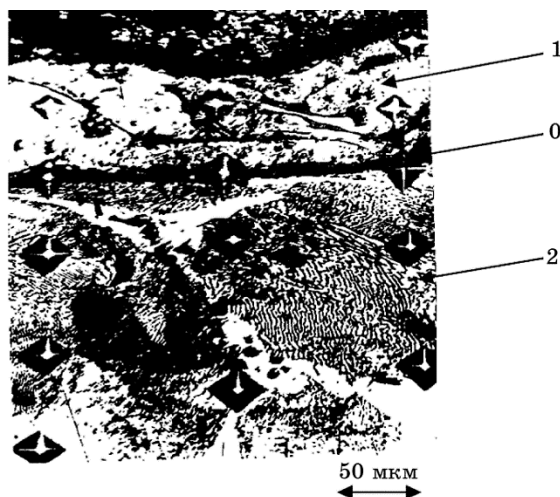


Рис. 2. Микрорельеф поперечного сечения контакта покрытие–подложка, полученного при дробеструйной активации подложки. Покрытие Нп-65Г (сверху), подложка — сталь Ст5. Обозначения: 0 — слой оксида, 1 — частица покрытия, 2 — металл подложки.

Fig. 2. The slice of cross-section of coating–substrate contact obtained by shot-blasting activation of the substrate. Coating Нп-65Г (on top), substrate—steel Ст5. Legend: 0—oxide layer, 1—particle of coating, 2—metal of substrate.

ТАБЛИЦА 4. Зависимость контактной температуры от времени контакта при температуре частицы покрытия 2735°C, 2500°C и 2330°C, температуре подложки 100°C и толщине оксидного слоя на подложке 7 мкм.

TABLE 4. The dependence of contact temperature on contact time at the temperatures of coating's particle of 2735°C, 2500°C, and 2330°C, substrate temperature of 100°C and thickness of oxide layer on the substrate of 7 microns.

τ/τ_0	0	1	2	3	5	9
τ , мкс	0	3,4	6,8	10,2	17	30,6
B	0,49	0,49	0,65	0,79	0,89	1,05
$t_1 = 2735^\circ\text{C}$	1853	1853	1690	1550	1480	1370
$t_k, ^\circ\text{C}$ $t_1 = 2500^\circ\text{C}$	1693	1693	1550	1430	1350	1250
$t_1 = 2330^\circ\text{C}$	1590	1590	1440	1330	1260	1160

такт и смачивание покрытия и подложки.

4. ВЫВОДЫ

1. Показано, что при контакте с частицей покрытия, температура на поверхности оксидной плёнки стальной подложки оказывается значительно выше, чем на ювенильной подложке, вследствие сравнительно низкой теплопроводности оксида.
2. Для частиц с температурой 2735°C уровень контактной температуры в течение 8 мкс существенно превышает температуру плавления оксидной плёнки, что является необходимым условием для её смачивания и обеспечения полноты физического контакта с частицей покрытия.
3. Для смачивания оксидного слоя подложки с начальной температурой 100°C необходимо, чтобы температура частиц покрытия превышала 2330°C , что соответствует интервалу температур частиц при распылении проволоки-анода.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Кудинов, В. М. Иванов, *Нанесение плазмой тугоплавких покрытий* (Москва: Машиностроение: 1981).
2. В. М. Корж, В. Д. Кузнецов, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко, *Нанесення покриття: навчальний посібник* (Ред. К. А. Ющенко) (Київ: Арістей: 2005).
3. А. Ф. Лисовский, *Миграция расплавов металлов в спечённых композиционных телах* (Киев: Наукова думка: 1984).
4. А. В. Ершов, О. Г. Быковский, А. Н. Лаптева, *Физика и химия обработки материалов*, № 1: 21 (2014).
5. А. И. Пехович, В. М. Жидких, *Расчёты теплового режима твёрдых тел* (Ленинград: Энергия: 1976).
6. А. В. Курдюмов, М. В. Пикунов, В. М. Чурсин, *Литейное производство цветных и редких металлов* (Москва: Металлургия: 1982).
7. А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др., *Физические величины: Справочник* (Ред. И. С. Григорьев, Е. З. Мейлихов) (Москва: Энергоатомиздат: 1991).
8. В. С. Чиркин, *Термофизические свойства материалов ядерной техники* (Москва: Атомиздат: 1967).
9. А. М. Зборщик, *Теоретические основы металлургического производства* (Донецк: ГВУЗ ДонНТУ: 2008).
10. А. В. Ершов, Н. Н. Сытников, О. Г. Быковский, *Вестник двигателестроения*, № 3: 28 (2004).

REFERENCES

1. V. V. Kudinov and V. M. Ivanov, *Nanesenie Plazmoy Tugoplavkikh Pokrytiy* (Moscow: Mashinostroenie: 1981) (in Russian).

2. V. M. Korzh, V. D. Kuznetsov, Yu. S. Borisov, and K. A. Yushchenko *Nanesennyya Pokryttya* (Ed. K. A. Yushchenko) (Kyiv: Aristey: 2005) (in Ukrainian).
3. A. F. Lisovskiy, *Migratsiya Rasplavov Metallov v Spechennykh Kompozitsionnykh Telakh* (Kiev: Naukova Dumka: 1984) (in Russian).
4. A. V. Ershov, O. G. Bykovskiy, and A. N. Lapteva, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 1: 21 (2014) (in Russian).
5. A. I. Pekhovich and V. M. Zhidkikh, *Raschety Teplovogo Rezhima Tverdykh Tel* (Leningrad: Energiya: 1976) (in Russian).
6. A. V. Kurdyumov, M. V. Pikunov, and V. M. Chursin, *Liteynoe Proizvodstvo Tsvetnykh i Redkikh Metallov* (Moscow: Metallurgiya: 1982) (in Russian).
7. A. P. Babichev, N. A. Babushkina, A. M. Bratkovskiy et al., *Fizicheskie Velichiny: Spravochnik* (Eds. I. S. Grigor'ev and E. Z. Meylikhov) (Moscow: Energoatomizdat: 1991) (in Russian).
8. V. S. Chirkin, *Teplofizicheskie Svoystva Materialov Yadernoy Tekhniki* (Moscow: Atomizdat: 1967) (in Russian).
9. A. M. Zborshchik, *Teoreticheskie Osnovy Metallurgicheskogo Proizvodstva* (Donetsk: GVUZ DonNTU: 2008) (in Russian).
10. A. V. Ershov, N. N. Sytnikov, and O. G. Bykovskiy, *Vestnik Dvigatelsestroeniya*, No. 3: 28 (2004) (in Russian).