

2. Обработка поверхности, потоком электронов с низкими значениями энергии (10-20 кэВ) в кислородсодержащей среде, изделий из Mn-Zn-феррита приводит к выравниванию рельефа поверхности, уменьшению межзеренных, внутризеренных пор и трещин и тем самым к повышению качества и стойкости к разрушению ферритовых изделий.

3. Данный метод электронной обработки с соответствующей модификацией может быть перспективен для управления микро- и наноструктурой поверхности ферритовых подложек для изделий микро- и нанoeлектроники.

Список литературы

1. Е.В. Саврук, С.В. Смирнов. Исследование структуры алюмооксидной керамики после электронной и лазерной обработки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2011. Т. 77. № 6. С. 32-35.
2. E.V. Savruk, S.V. Smirnov. The modification of Mn-Zn-ferrite surface by a low-energy electron beam // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2013. – Proceedings, 2013. P. 41-42.
3. Е.В. Саврук, С.В. Смирнов, А.С. Климов. Модификация поверхности Mn-Zn-феррита пучком низкоэнергетических электронов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2012. Т. 2. №2(26). С.172-174.
4. Е.В. Саврук, С.В. Смирнов. Возбуждаемые лазерным излучением конвективные движения в расплаве α -Al₂O₃ // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. №1-2. С.233-235.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ЧАСТИЦЫ ПРИ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ НА ЭНЕРГИЮ АКТИВАЦИИ АТОМОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПОДЛОЖКИ

Ю.А. УЛЫБИНА, Б.С. ЗЕНИН, Ю.А.ХРАПКОВСКАЯ

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: yau@tpu.ru

ASSESSMENT OF IMPACT OF SPEED PARTICLES AT GAS-THERMAL SPRAYING ON THE ACTIVATION ENERGE ATOMS IN THE SURFACE LAYER OF THE SUBSTRATE

Y.A. ULYBINA, B.S. ZENIN, Y.A.KHRAPKOVSKAYA

Tomsk Polytechnic University

E-mail: yau@tpu.ru

Abstract. In this paper we studied the features of the energy balance in the system particles - substrate during thermal spraying covering. The activation energy of the atoms in the hot surface layer of the substrate was estimated. The effect of particle velocity on the activation energy of the atoms of the substrate was investigated. It is shown that in the framework of the model chosen the activation energy of the atoms of the substrate is not depended on the speed of the particles.

Введение. Практика получения газотермических покрытий показывает, что для увеличения прочности сцепления покрытия с основой необходимо обеспечить

особые условия на границе частица-подложка. В работах [1] показано, что относительная адгезия зависит от энергии активации атомов в подложке E_a :

$$\frac{N(\tau)}{N_0} = 1 - \exp \left[- \frac{\nu \tau}{\exp \left(\frac{E_a}{kT_k} \right)} \right],$$

где N_0 – количество атомов на поверхности основы находящихся в физическом контакте; $N(\tau)$ – количество атомов из числа N_0 , прореагирующих за время τ ; ν – частота собственных колебаний атомов, k – постоянная Больцмана, T_k – температура в контакте на границе покрытие-подложка.



Рисунок 1 – Условная схема изменения потенциальной энергии системы атомов материалов частицы и основы в зоне контакта [1]

Переход из исходного состояния системы атомов поверхности частицы и основы, находящихся в физическом контакте, в конечное состояние, в котором величина адгезии определяется химический взаимодействием, происходит через активационный барьер E_a (рисунок 1). Здесь E_b – часть энергетического барьера, которая преодолевается за счет внутренней тепловой энергии частицы; E_p – повышение исходного энергетического состояния системы за счет кинетической энергии частицы.

В работе [2] представлена модель взаимодействия частицы с подложкой, в которой выделялся приповерхностный «горячий» слой, определяющий степень активации атомов в подложке (E_a). Расчет баланса энергии при взаимодействии напыляемой частицы с подложкой в момент полной её кристаллизации, проводился при условии, что частица, диаметром d_q нагретая до температуры плавления $T_q = T_{пл}$ напыляется со скоростью v_q , на холодную подложку с температурой $T_0 = 300$ К.

Уравнение теплового баланса для данного случая запишется в виде:

$$W_k + Q_{Tq} + Q_L = Q_q + Q_{гсл} + Q_{ост}$$

где W_k – кинетическая энергия частицы в момент встречи ее с подложкой ($W_k = mv_q^2/2$); Q_T – энергия, определяемая температурой нагрева частицы; Q_L – скрытая теплота кристаллизации; Q_q – тепловая энергия, сохраняемая в частице к моменту полной кристаллизации; $Q_{гсл}$ – энергия в «горячем» слое подложки; $Q_{ост}$ – остаточная энергия, передаваемая в объем подложки.

Целью настоящей работы является исследование особенностей изменения составляющих энергетического баланса системы напыляемая частица – подложка при газотермическом напылении в зависимости от скорости частиц. Провести оценку энергии активации атомов в горячем слое подложки. Провести исследования влияния скорости частицы на энергию активации атомов подложки.

Материалы и методика исследования. В зависимости от соотношения теплофизических характеристик материала частицы и материала подложки возможны различные сценарии формирования сплэта [3]. Рассмотрим следующую модель: «до взаимодействия – разогретая частица с кинетической энергией и холодная подложка, после взаимодействия – остывающийся сплэт и подогретая подложка (горячий приповерхностный слой и остальной объем)». Выделим в подложке тонкий приповерхностный слой толщиной Δh (рисунок 2), температура в «горячем» слое подложки отличается от температуры в контакте T_k не более, чем на ΔT , тогда

$$T_c = T_k - \Delta T$$

где T_c – минимальная температура «горячего» слоя на глубине Δh , которая задается произвольно, в зависимости от назначенного ΔT (30 К) [4].

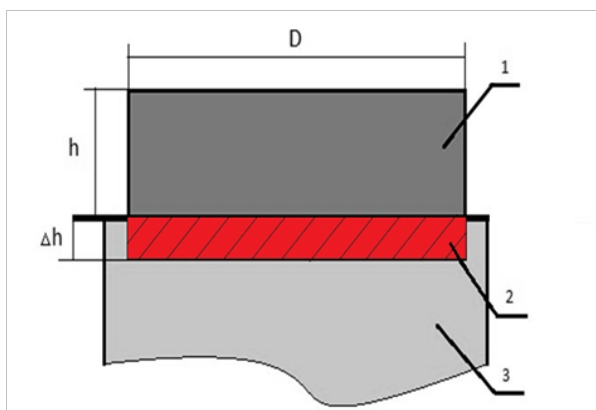


Рисунок 2 – Схема формирования сплэта (1 – сплэт, 2 – «горячий» слой, 3 – подложка)

Если общее число атомов в «горячем» слое равно N , то энергия активации отдельного атома в приповерхностном слое можно рассчитать по формуле $\varepsilon_{sc} = Q_{sc}/N$.

В соответствии с законом сохранения энергии запишем уравнение баланса энергии в системе частица-подложка для нашей модели до и после столкновения:

$$W_k + Q_{ТОч} = Q_{ч} + Q_n + \Delta W = Q_L + Q'_k = Q_{ч} + Q_{scл} + \Delta W_n + Q_{ост} \quad (1)$$

где W_k – кинетическая энергия частицы в момент встречи ее с подложкой; $Q_{ТОч}$ – тепловая энергия аккумулированная в напыляемой частице; $Q_{ч}$ – тепловая энергия, сохраняемая в частице к моменту полной кристаллизации; Q_n – тепловая энергия, переданная в подложку; ΔW – потери энергии; Q_L – скрытая теплота кристаллизации; Q'_k – энергия частицы с учетом вклада кинетической энергии; $Q_{scл}$ – энергия в «горячем» слое подложки; ΔW_n – изменение поверхностной энергии частицы, связанной с изменением формы частицы при ее деформации; $Q_{ост}$ – остаточная энергия, передаваемая в объем подложки.

В работе проведена оценка распределения энергии в системе «частица-подложка», в соответствии с уравнением (1) при разных скоростях. В качестве модельных материалов при проведении численных расчетов были выбраны для подложки – железо, для напыляемой частицы – вольфрам. Теплофизические характеристики материалов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Теплофизические характеристики материалов

Материал	T_n , К	ρ_0 , кг/м ³	C , Дж/кг·К	L , Дж/кг·10 ³
Fe	1810	7870	432,9	276
W	3693	19300	269	185

Расчет теплофизических параметров взаимодействия частицы с подложкой проводили для следующих условий: диаметр частицы $d_q = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; температура подложки $T_0 = 300$ К; температура частицы $T_q = T_{пл}$; скорость частицы v_q варьировалась от 100 до 1200 м/с.

Результаты расчета и их обсуждение. Результаты расчета распределения энергии в системе «частица-подложка» представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Составляющие теплового баланса в системе «частица-подложка»

v_q , м/с	$Q'_{кз}$, Дж	Q_L , Дж	Q_q , Дж	$Q_{гсл}$, Дж	$Q_{ост}$, Дж	ΔW_n
100	9,27E-03	1,87E-03	8,03E-03	1,56E-04	2,95E-03	1,37E-08
200	9,42E-03	1,87E-03	8,11E-03	1,56E-04	3,03E-03	1,91E-08
300	9,67E-03	1,87E-03	8,23E-03	1,56E-04	3,15E-03	2,59E-08
400	1,00E-02	1,87E-03	8,41E-03	1,56E-04	3,33E-03	3,06E-08
500	1,05E-02	1,87E-03	8,64E-03	1,56E-04	3,56E-03	3,42E-08
600	1,10E-02	1,87E-03	8,91E-03	1,56E-04	3,84E-03	3,71E-08
700	1,17E-02	1,87E-03	9,24E-03	1,56E-04	4,16E-03	4,05E-08
800	1,25E-02	1,87E-03	9,62E-03	1,56E-04	4,54E-03	4,24E-08
900	1,33E-02	1,87E-03	1,01E-02	1,56E-04	4,97E-03	4,67E-08
1000	1,43E-02	1,87E-03	1,05E-02	1,56E-04	5,45E-03	4,92E-08
1100	1,53E-02	1,87E-03	1,11E-02	1,56E-04	5,98E-03	5,19E-08
1200	1,65E-02	1,87E-03	1,16E-02	1,56E-04	6,56E-03	5,50E-08

Анализ полученных данных показывает, что общая энергии системы частица-подложка до соударения, а также суммарная энергия после соударения в системе «сплэт-подложка» и энергия отдельных частей системы растут с увеличением скорости частицы. Исключение составляет поведение энергии в «горячем» слое подложки $Q_{гсл}$, величина которой не зависит от скорости частицы.

Рассмотрим подробнее, как распределяется энергия в системе после столкновения. Больше всего энергии расходуется на тепло, сохраняемое в частице к моменту полной кристаллизации Q_q . Наименьший вклад в общий баланс энергии системы вносит ΔW_n , которую в дальнейшем можно не учитывать.

Из таблицы видно, что энергия в «горячем» слое подложки $Q_{гсл}$ не изменяется с увеличением скорости, с другой стороны известно, что на практике, для повышения адгезионных связей увеличивают скорость напыляемых частиц.

Вывод. Наши расчеты показывают, что с увеличением v_q форма сплэта изменяется – площадь основания сплэта увеличивается, а его толщина h уменьшается. Такая зависимость характерна и для толщины «горячего» слоя Δh . Его объем, как и $Q_{гсл}$ не изменяются. При этом количество атомов, содержащихся в «горячем» слое, сохраняется, а значит, энергия активации отдельных атомов в нем не зависит от скорости частицы.

Список литературы

1. Кудинов В.В., Пешков П.Ю., Балащенко В.Е. Нанесение покрытий плазмой – М.: Наука, 1990. - 408с.
2. Храпковская Ю.А., Зенин Б.С. Активация атомов подложки при взаимодействии напыленных частиц с основой в газотермическом покрытии. //XXI

Международная научная конференция студентов и молодых учёных СТТ-2015. – с.

3. Солоненко О.П., Шурина Э.П., Головин А.А. Конечно-элементное моделирование соударения капли расплава с подложкой при плазменном напылении // Физическая мезомеханика, 2001. – с. 29-42.
4. Храпковская Ю.А., Зенин Б.С. Энергетическая активация атомов подложки при формировании газотермического покрытия // Новые материалы. Создание, структура, свойства: Сборник научных трудов XIV Всероссийской школы-семинара. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – с.139-142

ВЛИЯНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ И ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА ПОКРЫТИЕ ИЗ ХРОМОВАНИДИЕВОГО ЧУГУНА

А.М.ТОЛСТОКУЛАКОВ¹, Б.В.ДАМПИЛОН²

¹ Томский политехнический университет

² Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: ist.jimmy@mail.ru

IMPACT CONTINUOUS AND IMPULSE ELECTRON BEAM PROCESSING TO SURFACE OF CHROMIUM-VANADIUM CAST IRON

A.M.TOLSTOKULAKOV¹, B.V.DAMPILON²

¹ Tomsk Polytechnic University

² Institute of Strength Physics and Materials Science

E-mail: ist.jimmy@mail.ru

Annotation. The paper reports the results of an investigation of structure formation in the eutectic chromium-vanadium cast iron coating deposited by electron-beam hardfacing (EBH) and subjected to multipoint pulsed electron-beam treatment (MPEBT) of the surface layers. The coating material structure in the zones modified by MPEBT changes considerably, showing the presence of a large amount of supersaturated austenite matrix and eutectic colonies in the form of fine isolated inclusions. The eutectic colonies are fan-like. The leading phase in the eutectic colonies is vanadium carbide. After aging within the temperature range from 900 to 1100 °C the structure of the modified zones exhibits a large amount of fine secondary carbides Cr₇C₃ rejected from the matrix. The secondary carbides are uniformly distributed in the bulk of the modified zones. The matrix after aging undergoes $\gamma \rightarrow \alpha$ transformation and mainly has the martensitic structure. Aging increases significantly the hardness of the modified zones and abrasive wear resistance of the entire coating.

Введение. Упрочнение различных деталей машин всегда востребовано в отрасли машиностроения. Концентрированные источники энергии, такие как лазерный и электронный луч, активно применяются для модифицирования поверхности, сварки, наплавки [1-3].

Цель работы. Проведение исследования и анализа структуры и свойств покрытия, состоящего из хромованидиевого чугуна, которое было получено с использованием метода электронно-лучевой наплавки и электронно-лучевой обработки в вакууме.