

# **ВЛИЯНИЕ АНОМАЛЬНОГО МАССОПЕРЕНОСА НА АДГЕЗИОННУЮ ПРОЧНОСТЬ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОРОШКОВЫХ ПОКРЫТИЙ ПОЛУЧЕННЫХ МЕХАНОТЕРМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

**Лопата Л.А., Ляшенко Б.А., Корниенко А.О., Корж В.Н.**

(НАУ, НТУУ «КПІ», г. Київ, Україна)

*It is rotined by the methods of quantitative stereologic analysis sweepable electronic microscopy and x-ray microspectral analysis, that high durability of triping of coverages at the elektrokontaktnom burning of powder-like materials with the hardenable surface of detail is provided due to the phenomenon of anomalous massoperenosa.*

## **ВВЕДЕНИЕ.**

К механотермическим методам упрочнения и обработки, как и к импульсным технологиям, в основе которых лежат принципы синхронного сочетания импульсных режимов механической и электрической энергии относятся электроконтактные методы. При получении порошковых покрытий методом электроконтактного припекания прочность сцепления покрытий с основой достигает 200-220 МПа. На сегодняшний день нет ответа на вопрос за счет чего обеспечивается высокая прочность сцепления при электроконтактном припекании (ЭКПП). Поэтому целью данной работы является поиск ответа на этот вопрос.

Вопрос о физических основах прочности сцепления, как и состояние теории адгезии, весьма сложен и противоречив [1]. Сцепление в адгезионном контакте в различных случаях объясняется молекулярным, диффузионным, донорно-акцепторным, механическим взаимодействием, а также изменением энергетического и структурного состояния перенесенного и основного материалов. Можно согласиться с мнением ряда исследователей, что прочность сцепления обусловлена суммарным действием перечисленных факторов. При этом влияние каждого из этих факторов на прочность сцепления изменяется в зависимости от природы материала основы и покрытия, их свойств и технических параметров процесса нанесения покрытия, в нашем случае электроконтактного припекания [2].

В связи с этим при помощи методов металлографического и рентгеноспектрального анализа исследовали границы раздела основа-покрытие и определяли прочность сцепления покрытий с основой для различных способов нанесения покрытий по методике, описанной в работе [3].

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.** Объяснить высокую прочность сцепления при электроконтактном припекании.

## **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Электроконтактное припекание осуществляется под давлением при прямом пропускании электрического тока и характеризуется силой тока до 8...30 кА, вторичным напряжением 1...6 В, давлением до 100 МПа, временем импульса 0,04...0,2 с, временем паузы 0,04...0,2 с., высокими скоростями нагрева, которые могут достигать  $10^3 \dots 10^4$  К/с. [4].

Исследования проводили на образцах из стали 45. в качестве материала покрытия использовали порошки самофлюсов на основе никеля (ПГ-СР3, ПГ-СР4 ГОСТ 21448-75). Исследование прочности сцепления осуществлялось по методике [5] Исследование микроструктуры проводилось на нетравленых и травленых шлифах на световом микроскопе «MeF-3» фирмы "Reichert" (Австрия) при увеличении  $\times 100$ ,  $\times 200$ ,  $\times 500$  Качественный стереологический анализ образцов проводился на аттестованном автоматическом анализаторе изображения «Mini-Magiscan» фирмы "Joyce Loeb", Англия,

по программе «Genias 26». Для исследования распределения легирующих элементов в покрытии использовали метод сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализатора. Исследование проводили на сканирующем электронном микроскопе "CamScan" ("Oxford Instruments", Англия) с рентгеновским энергодисперсионным анализатором. Морфология (топография) поверхности покрытий исследовалась в режиме отраженных электронов при ускоряющем напряжении 10-20 кВ. Разрешающая способность данного СЭМ составляет 70 А. Применяли два типа исследований: спектр с поверхности шлифа и структура поверхности в сочетании с У-модуляцией, т.е. - медленное сканирование электронного пучка вдоль линии с регистрацией рентгеновского излучения по каждому элементу с и построением концентрационных кривых распределения. Кроме того, проводился точечный микрорентгеноспектральный анализ по программе количественного анализа. Результаты исследований представлены в таблицах. Для исследования распределения элементов по поверхности применяли также съемку в характеристическом рентгеновском излучении по программе «Smart map», имеющей два режима. В первом случае на экране цветного дисплея получали картину распределения одного из элементов. Цвет на фотографии определяет концентрацию: черный – полное отсутствие элемента, белый – 100-процентное присутствие, переходные цвета говорят о промежуточной концентрации. Во втором случае получаем распределение трех и более элементов одновременно, при этом каждому из элементов присваивается условный цвет. Все остальные цвета образуются при наложении трех основных и говорят о совместном присутствии элементов на том или ином участке образца, а концентрация в этом случае определяется плотностью цвета. Применение этой программы исследований дает очень хорошие результаты для понятия механизмов диффузионных процессов.

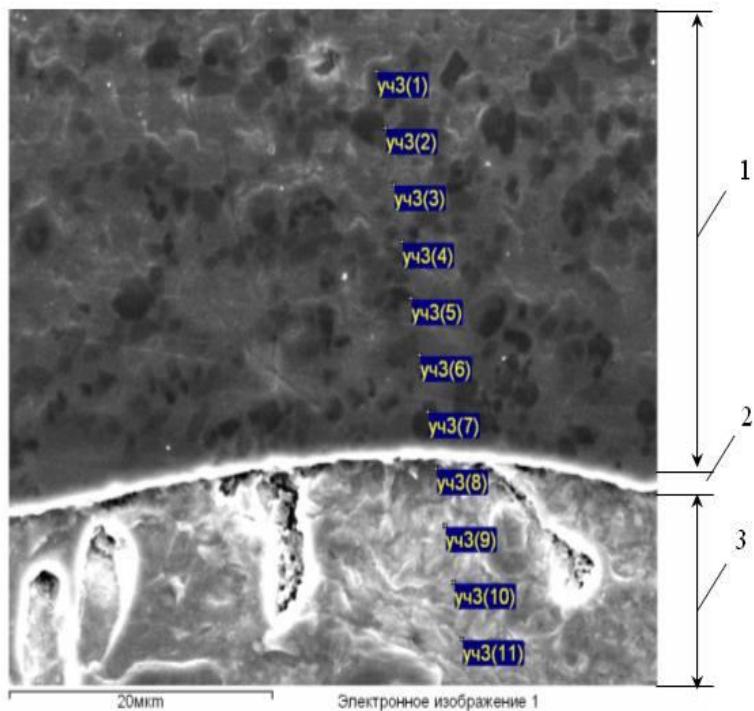
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований, представленные на рис., показывают, что за время действия синхронизированных импульсов тока и давления, в результате реализации электропластического эффекта (эффекта Троицкого [6]) происходит мгновенное разупрочнение и, как следствие, высокоскоростная пластическая деформация ( $10 \leq \dot{\varepsilon} \leq 10^2 \text{ с}^{-1}$ ), в результате чего возникает развитая диффузионная зона между покрытием и металлом основы. Кроме того, имеет место также диффузия атомов основного металла в покрытие, практически на всю толщину покрытия. При режимах припекания:  $I_{ce} = 9 \text{ кА}$ ,  $t$  импульса = 0,06 с,  $p = 80 \text{ МПа}$ ,  $D = 0,3 \cdot 10^{-2} \dots 16 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{с}$ , глубина проникновения составляет до 10...12 мкм. С ростом величин давления и силы тока диффузионная зона возрастает и достигает значения ~ 25 мкм.

Равномерность распределения элементов в матрице в слоях, параллельных поверхности, оценивалась путем проведения количественного анализа с шагом 10 мкм на дистанции 200 мкм. Концентрация легирующих элементов на середине диффузионной зоны показана в таблице на рис.

С целью выявления влияния процесса припекания на уровень межфазного взаимодействия компонентов композиционного порошка, был проанализирован характер концентрационных кривых, полученных метолом количественного рентгеноспектрального анализа на шлифах исходных покрытий, полученных припеканием.

Как видно из рис., степень межфазного взаимодействия при припекании усиливается – граничная зона между наполнителем и матрицей более «размыта». Это связано с определенной растворимостью карбидов в металлах матрицы, а также с диффузионными процессами.



Спектр	Al	Si	P	Cr	Mn	Fe	Ni
yч3(1)	0.06	3.39	0.00	38.97	0.30	5.17	52.23
yч3(2)	0.14	1.65	-0.41	34.46	0.10	4.00	60.06
yч3(3)	0.03	6.48	-0.02	8.45	0.26	5.87	78.92
yч3(4)	0.09	0.73	-0.17	27.49	0.03	4.79	67.04
yч3(5)	0.12	2.60	0.08	14.12	-0.07	4.59	78.80
yч3(6)	0.27	5.62	0.23	13.49	0.15	4.90	75.35
yч3(7)	0.25	0.97	0.05	74.51	0.17	3.59	20.96
yч3(8)	0.06	0.09	0.01	2.67	0.76	92.90	3.65
yч3(9)	0.01	0.47	0.16	0.79	0.45	96.65	1.82
yч3(10)	0.35	0.45	0.14	0.47	0.40	97.49	0.70
yч3(11)	0.24	0.69	0.24	0.45	0.51	98.24	0.11

Рис. Микроструктура покрытий (x2000). Распределение легирующих элементов (материал покрытия ПГ-СР4): 1 – покрытие; 2 – переходная зона (диффузионная зона); 3 – деталь (основа).

Следует отметить, что уровень межфазного взаимодействия при припекании гораздо ниже, чем при газопламенном напылении керамико-металлических композиционных порошков. По своей сути контактное припекание композиционных порошков представляет собой вторичную термообработку (точнее термомеханическую обработку), которая способствует завершению начавшихся при спекании порошков физико-химических процессов и улучшению конечного качества покрытий.

Расчет коэффициентов диффузии проводили по методу Матано [7], с использованием формулы  $D = \frac{1}{\tau} \frac{dx}{dC} \int_0^c x dC$ , где  $\tau$  - время прохождения диффузии;  $\frac{dx}{dC}$  - производная (расстояние от нулевой линии) по  $c$  (концентрации);  $\int_0^c x dC$  - интеграл от этой функции при предельных значениях концентрации. Соответствующие коэффициенты диффузии (массопереноса) представлены в табл. Из ее рассмотрения

вытекает, что скоростная деформация при электроконтактном припекании приводит к увеличению подвижности атомов как в покрытии, так и в основе (упрочняемая деталь) на 10-11 порядков аналогично тому, что происходит при механическом нагружении и пропускании импульсов электрического тока [8]. Отметим, что авторы [8] изучали массоперенос при более низких и более высоких технологических параметрах. Таким образом, прирост коэффициентов массопереноса по сравнению с квазистатическим сжатием является следствием импульсного характера нагружения, а не конкретных значений тока, напряжения, давления, длительности импульса и др.

Таблица. Влияние состояния материала и вида диффундирующих атомов на подвижность атомов в металлах при квазистатическом ( $D$ ) и импульсном ( $D_M$ ) воздействиях

Диффузант	Металл	$D \cdot 10^{11}$ , см <sup>2</sup> /с	$D_M \cdot 10^5$ , см <sup>2</sup> /с
Ni	Железо (основа)	0,4	3,0
Cr	Никель (покрытие)	6,5	6,3
W	Железо (покрытие)	3,2	5,2
Fe	Никель (покрытие)	7,6	3,9
Al	Никель (покрытие)	65,0	7,1
Mn	Никель (покрытие)	98,0	9,2

Сравнение прочности сцепления с матрицей хромоникелевых покрытий, полученных напылением, отжигом при постоянном давлении и электроконтактным припеканием, показывает, что метод ЭКПП позволяет повысить адгезию до 220 Мпа по сравнению 80 МПа, характеризующими сцепление напыленных и обработанных в квазистатическом режиме покрытий. Отметим, что не только протяженность диффузионной зоны, но и ее структура различается в зависимости от импульсного или квазистатического воздействия.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, увеличение адгезии связано с явлением ускоренной миграции атомов при электропластическом эффекте за счет образования значительной диффузионной прослойки. Необходимо в дальнейших исследованиях определить технологические режимы и составы покрытий, обеспечивающие максимальное ускорение аномальной диффузии.

**Список литературы:** 1. Аппен А.А. О теоретических критериях адгезии покрытий в металлах. – В кн.: Неорганические и органические покрытия. Л., 1975, С. 3-11. 2. О применении различных теорий адгезии к жаростойким покрытиям /Э.С.Уманский, Б.А.Ляшенко, В.В.Ришин и др.///Защитные покрытия на металлах. Рес. меж вед.сб. вып.12, Киев, Наукова думка, 1978. 3. Ришин В.В. Исследование прочности сцепления некоторых защитных неорганических покрытий при комнатной и высоких температурах. Автореф. канд..дис. К., 1973. – 26 с. 4. Ярошевич В.К., Генкин Я.С., Верещагин В.А.. Электроконтактное упрочнение. – Минск: Наука и техника, 1982. – 256 с. 5. Дмитриев Ю.В. Методологический подход к исследованию механических характеристик материалов с покрытиями: Дис...канд. техн. наук: 05.02.09: К., 1990. – С. 61-92. 6. Троицкий О.А., Розно Л.Т. Электропластический эффект в металлах. // ФТТ. — 1970. — 12, № 1. — С. 203 – 210 с. 7. Зайт В. Диффузия в металлах. – М.: ИЛ, 1958. – 371 с. 8. Мазанко В.Ф., Покоев А.В., Миронов В.М. Диффузионные процессы в металлах под действием магнитных полей импульсных деформаций. 1 том, - Москва, 2006. С. 243-249.

Сдано в редакцию 01.06.08