

## СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ИЗ СПЛАВА НА ОСНОВЕ Ni С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ

А.Д. Погребняк<sup>1)</sup>, Ю.А. Кравченко<sup>1)</sup>, В.В. Василюк<sup>1)</sup>, В.В. Понарядов<sup>2)</sup>, Ш.М. Рузимов<sup>3)</sup>, Ю.Н. Тюрин<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Сумской институт модификации поверхности, г. Сумы, Украина

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, г. Минск, Беларусь

<sup>3)</sup>Ташкентский Государственный Университет, г. Ташкент, Узбекистан

<sup>4)</sup>Институт электросварки им. О.Е. Патона, НАН Украины, г. Киев, Украина

В работе представлены результаты по исследованию структуры, элементного и фазового состава порошковых покрытий, нанесенных с помощью высокоскоростной плазменной струи на подложку из малоуглеродистой стали с последующей обработкой поверхности покрытий импульсным плазменным потоком и электронным пучком. Установлена зависимость формирования рельефа, элементного и фазового состава поверхности от выбора дальнейшего способа её модификации. Импульсно-плазменная модификация поверхности покрытия сопровождается образованием интерметаллических соединений FeCr, Fe<sub>2</sub>Mo<sub>6</sub> и FeMo. Обработка поверхности электронным пучком приводит к хорошей адгезии в области покрытие-подложка и взаимному обмену покрытия и подложки соответствующими составными элементами.

### Введение

Интенсивное развитие новых методов обработки поверхности изделий позволяет целенаправленно изменять служебные характеристики металлических материалов, а именно: коррозионную и электроэрозионную стойкость, усталостную прочность, износ и т.д. Перспективным методом нанесения покрытий является плазменно-детонационный, который позволяет получать покрытия достаточно хорошего качества и имеет высокую производительность [1]. С целью улучшения адгезии в области покрытие-подложка используется обработка поверхности, как потоками импульсной плазмы, так и электронными пучками высокой плотности энергии. Воздействие таких концентрированных потоков энергии на поверхность твердого тела приводит к поглощению части падающей энергии, которая, в свою очередь, обуславливает протекание разнообразных физико-химических явлений в поверхностном слое материала (нагрев, структурные фазовые переходы с изменением агрегатного состояния, изменение фазового состава поверхности, интенсификацию практически всех механизмов диффузии и т.д.) [2].

Целью данной работы является получение порошковых покрытий на малоуглеродистой стали, нанесенных плазменно-детонационным методом с последующим оплавлением поверхности электронными пучками и импульсными потоками плазмы. А также исследование их структуры, элементного и фазового состава.

### Методика эксперимента

Материалом для получения коррозионно-стойких покрытий служил порошок ПГ-10Н-01 (основа – Ni; В: 2,8-3,4 %; С: 0,6-1,0 %; Si: 4,0-4,5 %; Cr: 19-20 %; Fe: 4-4,5 %). С помощью установки «Импульс-5» на подложку из малоуглеродистой стали высокоскоростной плазменной струей было нанесено покрытие из никелевого сплава ПГ-10Н-01 толщиной от 60 до 110 мкм. Полное потребление компонентов смеси сгорания составляло 2 м<sup>3</sup>/ч, частота следования импульсов 4

Гц. Скорость плазменной струи достигала 8 км/с при температуре плазменного потока 3\*10<sup>4</sup> К. Плотность мощности импульсной плазмы 5,8\*10<sup>6</sup> Вт/см<sup>2</sup>. Далее часть образцов была оплавлена импульсным плазменным потоком (в качестве легирующего материала использовали эродирующий электрод из Мо), а часть модифицировалась электронным пучком на установке «У-212». Оба способа обработки поверхности покрытий сопровождаются очень большими скоростями отвода тепла вглубь поверхности материала, что в свою очередь влечет за собой уменьшение силы поверхностного натяжения материала покрытия.

Исследование микроструктуры поверхности порошкового покрытия проводилось на сканирующем электронном микроскопе РЭММА-102. Качественный и количественный микроанализ поверхности выполнялся на рентгеновском волновом спектрометре WDS-2. Исследование фазового состава покрытия проводили методом рентгеноструктурного анализа при помощи рентгеновского дифрактометра ДРОН-2,0.

### Результаты исследований и их обсуждение

Результаты проведенных исследований микроструктуры поверхности свидетельствуют о разных морфологических особенностях поверхности покрытий, формирующихся под влиянием потока импульсной плазмы и электронного пучка. На рис.1 представлено снимки общего вида полученных покрытий. Судя по характеру микрорельефа поверхности покрытия (рис.1а), подданного импульсно-плазменному оплавлению, оно имеет очень большую шероховатость. Формирование на поверхности волнистого микрорельефа связано с частичным оплавлением некоторых частичек порошка в плазменном потоке и их высокоскоростным деформированием на поверхности подложки. В нескольких местах вообще можно увидеть явное очертание застывших деформированных частичек порошка (обозначение стрелочками на рис.1а). На поверхности четко видны отдельные

ровные тёмные участки покрытия, имеющие явную зернистую структуру. Наблюдается также присутствие впадин с сильно рельефным дном с чередующимися темными и светлыми участками.

На рис.1.б показано участок поверхности порошкового покрытия, оплавленного электронным пучком. Эта поверхность практически ровная со слабо выраженными впадинами. В большинстве случаев в этих впадинах покрытия скопляется множество светлых включений, которые (согласно данным элементного анализа) в своём составе имеют значительные доли таких элементов как Si, S, Ca, Al и Mn. На поверхности зафиксировано неравномерно разбросанные темные участки, состоящие большей частью из атомов Fe (в некоторых точках его концентрация достигает 94 %). На рис.2а приведен спектр, снятый в одной из таких точек покрытия. Вероятнее всего, что модификация поверхности электронным пучком сопровождается полным проплавлением порошка, оплавлением поверхности подложки и её локальным перемешиванием с компонентами подложки. Согласно данным интегрального анализа элементного состава поверхности (рис.2б), на железо отводится порядка 28,5% от общего состава поверхности покрытия. Кроме этого в состав покрытия входит около 15 ат% Cr. Основным элементом поверхности выступает Ni (около 40,5 ат%).

На рис.2 (в,г) приведены спектры, снятые в разных областях поверхности покрытия после импульсно-плазменного оплавления. Интегральная характеристика участка поверхности покрытия,

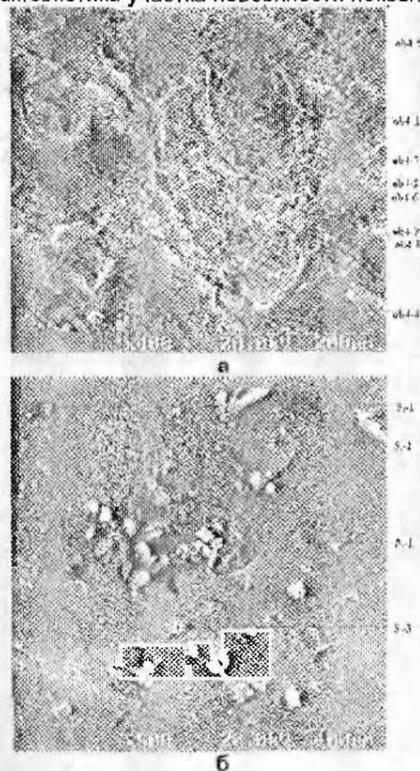


Рис.1 Структура поверхности порошковых покрытий: а – импульсно-плазменная модификация поверхности; б – поверхность покрытия, оплавленного электронным пучком

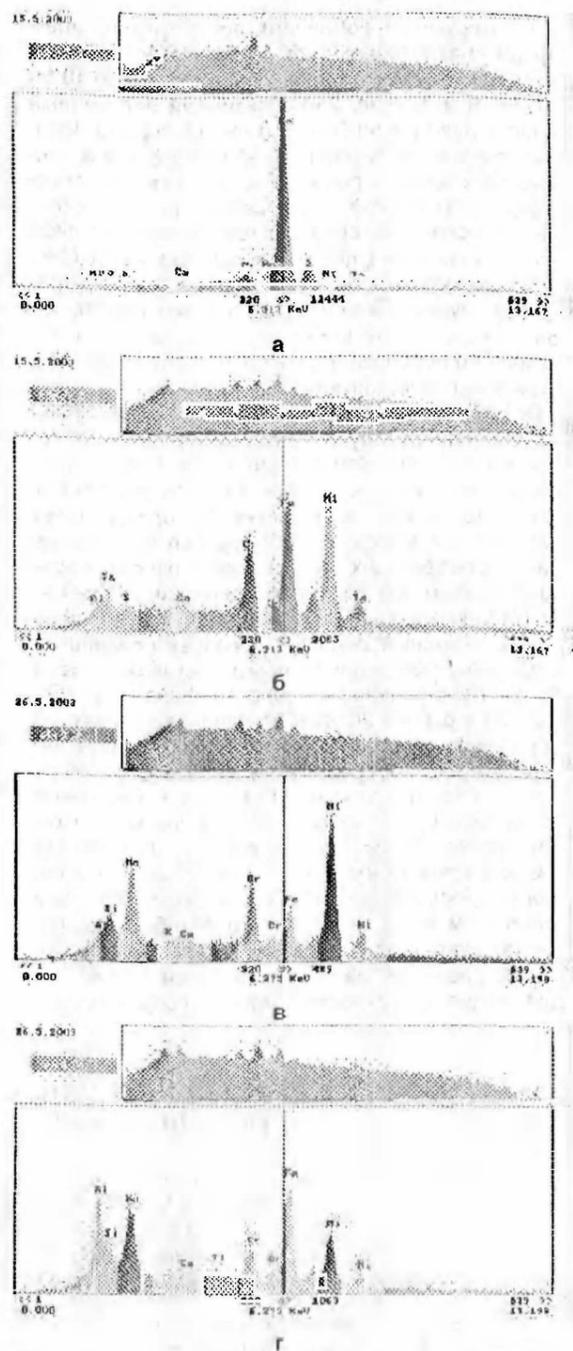


Рис.2 Спектры элементного анализа состава порошковых покрытий:

а – локальный элементный анализ поверхности покрытия в точке 5-1, обозначенной на рис. 1б; б - интегральная характеристика участка покрытия, оплавленного электронным пучком; в - интегральная характеристика участка покрытия, модифицированного импульсными потоками плазмы; г - локальный элементный анализ поверхности покрытия в точке 4-5, обозначенной на рис. 1а

представленного на рис.1.а, указывает на то, что его основными составляющими элементами являются Ni (52,1 %), Fe (9,3 %), Cr (12,6 %), а так-

же легирующий компонент эродированного электрода плазматрона – Mo (21%). На поверхности наблюдаются небольшие концентрации (до 10%) Al, Si, S и Ti (рис. 2.в). Локальный элементный анализ наводит на мысль о неоднородном перераспределении элементов, входящих, как в исходный состав порошка, так и в газовую атмосферу плазматрона. На поверхности зафиксировано участки, в которых Al либо вообще нет, либо его концентрация достигает порядка 21% (рис. 2г). Наблюдаются области, в которых концентрация Ni опускается от 77 до 3% (учитывая то, что он является основным составляющим элементом исходного порошка), при этом концентрация Mo в этой области достигает порядка 84%.

Порошковое покрытие, обработанное импульсно-плазменной струей в режиме оплавления, является многофазным соединением. Основу матрицы покрытия составляют 48% Ni и 20% Mo. Согласно расчетам, решетка Ni претерпевает некоторые изменения. Наблюдается возникновение растягивающих напряжений с последующим увеличением его параметра решетки:  $a(\text{Ni})=3,53 \text{ \AA}$ ; (табличные данные:  $a(\text{Ni})=3,524 \text{ \AA}$  [3]). Оплавление, исходный порошок образует соединение FeCr, массовая доля которого составляет около 15%. Явное поднятие области фона рентгенограммы в районе  $2\theta \sim 42+50^\circ$  свидетельствует об образовании на поверхности покрытия двух интерметаллидных соединений железа с молибденом:  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$  и, возможно, FeMo. Они составляют около 12 и 4% от общего состава покрытия соответственно. Установлено сильное влияние оплавления поверхности покрытия пучком на состав формирующихся порошковых покрытий. Базовым элементом покрытия является Ni (65%). Но решетка этого компонента сильно растянута. Согласно расчетам, её параметр равен  $3,55 \text{ \AA}$ . Модификация поверхности покрытия сопровождается

также образованием на поверхности покрытия оксидных соединений  $\text{Ni}_2\text{O}_3$  (9%) и, возможно, NiO (4%). В состав поверхности покрытия входит 6,5% Cr (один из основных компонентов исходного состава порошка). Проплавление поверхности образцов электронным пучком является причиной присутствия на поверхности 6% чистого  $\alpha$ -Fe, а также 9% его оксида -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

#### Заключение

Таким образом, проведенные исследования элементного состава порошковых покрытий указывают на то, что основной составляющей поверхности покрытий после импульсно-плазменной модификации является Ni. Появление легирующего компонента в поверхности покрытия приводит к изменению фазового состава поверхностного слоя и появлению интерметаллидных соединений  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$  и FeMo. Оплавление поверхности покрытия и подложки электронным пучком с последующим перемешиванием их компонентов влечет за собой появление в никелевой матрице покрытия составных компонентов матрицы подложки. Проведенные исследования позволяют установить взаимосвязь между фазовым, химическим составом и морфологией поверхности покрытий при различных способах модификации поверхности.

#### Список литературы

1. Борисов Ю., Борисова А. Плазменные порошковые покрытия.-К.: Техніка, 1986.-223 с.
2. Валяев А., Погребняк А., Кишимото Н., Ладисев В. Модификация свойств материалов и синтез тонких пленок при облучении интенсивными электронными и ионными пучками.- Усть-Каменогорск, 1999.-285 с.
3. Горелик С., Расторгуев Л., Скаков Ю. Рентгенографический и электроннооптический анализ. - М.: Металлургия, 1982.-367с.

### STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF COATINGS PRODUCED FROM ALLOY ON Ni BASE USING HIGH-VELOCITY PLASMA JET

A.D.Pogrebnyak<sup>1)</sup>, Yu.A.Kravchenko<sup>1)</sup>, V.V.Vasiliuk<sup>1)</sup>, V.V.Ponariadov<sup>2)</sup>, Sh.M.Ruzimov<sup>3)</sup>, Yu.N.Tyurin<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Sumy Institute for Surface Modification, 40030 Sumy, Ukraine

<sup>2)</sup>Belarus State University, Minsk, Belarus

<sup>3)</sup>Tashkent State University, Tashkent, Uzbekistan

<sup>4)</sup>Institute for Electric Welding, O.E.Paton, NAN of Ukraine, Kiev, Ukraine

The paper presents the results of investigation of the structure, element, and phase composition of the powder coatings deposited on the substrate of the low-carbon steel using the high-velocity plasma jet with subsequent treatment of the produced coating by the pulsed plasma flow and the electron beam. The dependence of the relief formation, the element and phase composition on the choice of the subsequent surface treatment had been found. The pulsed-plasma modification of the coating surface was accompanied by the formation of inter-metalloid compounds FeCr,  $\text{Fe}_7\text{Mo}_6$  and FeMo. The subsequent treatment by the electron beam resulted in good-adhesion of the coating with the substrate and their inter-change of the corresponding composition elements.