

3. Корнилов М.И., Белоусов О.К. Никелид титана и другие сплавы с ЭПФ.– М., 1977.

4. Руководство к лабораторным занятиям по физике/ Под ред. Л.Л. Гольдина.– М., Наука, 1964.

5. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика.– М.: Химия, 1989.

УДК 621.9.048.7:621.791.92

## ДИСТАНЦИОННАЯ НАПЛАВКА МАТЕРИАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИМПУЛЬСНЫМ СИЛЬНОТОЧНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

*А.В. Пащенко, А. Г. Пономарёв, В.В. Слёзов, В.Т. Уваров,  
В.И. Шеремет, Б.М. Широков*

г. Харьков, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»

*Описан способ нанесения покрытий, позволяющий совместить высокотемпературный химический синтез со сверхбыстрым охлаждением при больших давлениях, в котором электронный пучок ускоряет расплавленный слой по направлению к холодной подложке. Рассмотрены условия, при которых возможна равномерная наплавка материалов на подложку.*

Наплавка металлов и сплавов на поверхность изделий получила значительное распространение в промышленности. При этом большинству способов наплавки присущ общий недостаток – сильный нагрев изделия под наплавляемым слоем. Применение для наплавки релятивистского пучка электронов (РЭП) [1] позволило уменьшить прогрев подложки, однако не устранило его полностью. Между тем существует необходимость в нанесении на поверхность покрытий с видоизменёнными свойствами, например, аморфных слоёв или слоёв, находящихся в метастабильном состоянии. Такие слои обычно получают при сверхбыстром охлаждении расплавленных материалов на холодной подложке.

В настоящей статье излагается способ нанесения покрытий [2], который значительно расширяет возможности разработчиков, занимающихся целенаправленным изменением свойств поверхности.

Разработанный нами способ включает облучение импульсным сильноточным релятивистским пучком слоя наносимого материала с его расплавлением и последующей наплавкой на поверхность подложки. При этом облучают слой, расположенный на некотором расстоянии от подложки, а электронный пучок в промежутке между слоем и подложкой подвергают деструкции.

Испаряющаяся под воздействием сильноточного электронного пучка часть слоя не

попадает на подложку, но другая, расплавленная его часть, приводится в реактивное ускоренное движение в направлении подложки. В процессе полёта слой подзарядается пучком и получает дополнительное ускорение за счёт электростатического притяжения к заземлённой подложке. Расплавленный пучком слой с большой скоростью налетает на практически холодную поверхность и частично расплавляет её. Материал слоя смешивается с материалом подложки и вступает с ним в химическую реакцию в специфических условиях.

При закалке из жидкого состояния результат структурных и фазовых превращений определяется возникающим давлением в расплавах в процессе их охлаждения, которое при скорости налетающей жидкости 100 м/с достигает значений  $10^8 - 3 \cdot 10^9$  Па [3]. Скорость, приобретаемая слоем в предлагаемом техническом решении, может достигать десятков км/с. При этом изменяются температуры фазовых переходов, расширяются диапазоны концентраций на диаграммах состояния и т. д. Все эти изменения используют для формирования покрытий с необходимыми свойствами, например, для повышения твёрдости, износостойкости или для аморфизации.

Для активации в слое химических реакций, структурных и фазовых превращений энергия пучка должна быть эффективно введена в наносимый слой. Если располо-

жить наносимые материалы непосредственно на поверхности изделия, как это было сделано в [1], то при используемых нами плотностях мощности покрытие не будет удерживаться на поверхности изделия.

Образование зазора между наносимым слоем и подложкой позволяет вводить энергию пучка в основном только в наносимый материал. Подвергая пучок в зазоре частичной или полной деструкции, можно контролировать нагрев подложки, что расширяет технологические возможности способа.

Плотность мощности электронного пучка, облучающего слой, выбирают из диапазона  $5 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Плотности мощности  $q < 5 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> недостаточно для интенсивного испарения слоя с поверхности, обращенной к пучку, и для приведения его в ускоренное движение по направлению к подложке. При  $q > 5 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup> наступает неприемлемый режим абляции, когда пучок испаряет слой без его существенного расплавления.

Рассмотрим условия, при которых возможна наплавка покрытия на подложку. Интенсивное истечение вещества под воздействием электронного пучка приводит наносимый слой в ускоренное движение. Летящий к подложке слой в начальной стадии полёта продолжает облучаться электронами пучка, заряжаясь отрицательно. В жидком слое, находящемся под воздействием сил поверхностного натяжения, развивается гидродинамическая неустойчивость типа неустойчивости Релей–Тейлора. При возникновении небольших возмущений поверхности силы электростатического расталкивания увеличивают эти возмущения вплоть до разрыва жидкого слоя на капли. При этом сплошность осаждаемого покрытия нарушается. Время возникновения Релей–Тейлеровской гидродинамической неустойчивости  $\approx \gamma_n^{-1}$ , где  $\gamma_n$  – инкремент неустойчивости.

$$\gamma_n \approx \frac{2}{d^2} \sqrt{\frac{\sigma \cdot D}{\rho}},$$

где  $\sigma$  – эффективный коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

$D$  – характерный поперечный размер летящего слоя, м;

$d$  – толщина слоя, м;

$\rho$  – плотность вещества слоя, кг/м<sup>3</sup>.

Это время определяет максимальное расстояние от подложки, на котором может находиться слой. Закон реактивного движения слоя под воздействием облучения электронным пучком имеет вид:

$$Z = \frac{L \cdot \rho \cdot d \cdot V}{q} \{-\tau - \ln(1 - \tau)\}$$

$$\tau = \frac{q}{L \cdot \rho \cdot d} \cdot t,$$

где  $q$  – плотность мощности пучка, Вт/м<sup>2</sup>;

$L$  – удельная энергия испарения, Дж/кг;

$V$  – скорость истечения вещества с облучаемой поверхности, м/с;

$t$  – время, с.

При  $\tau \ll 1$  эта формула приобретает вид

$$Z = \frac{L \cdot \rho \cdot d \cdot V}{q} \cdot \frac{\tau^2}{2}.$$

Расстояние  $Z_d$ , при котором наступает каплеобразование, получают подстановкой  $\gamma_n^{-1}$  в эту формулу

$$Z_d = 2 \cdot \frac{q \cdot d^3 \cdot V}{L \cdot \sigma \cdot D},$$

где  $q$  – толщина слоя из наносимого материала, м;

$D$  – поперечный размер наносимого слоя, м;

$V$  – скорость истечения вещества с облучаемой поверхности слоя, м/с;

$L$  – удельная энергия испарения, Дж/кг;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения расплавленного слоя, Н/м.

Достаточно наличия развитой гидродинамической неустойчивости, чтобы заряженная жидкость раздробилась на капли. Минимальное расстояние слоя от подложки определяется протяжённостью зоны деструкции  $Z_d$ , то есть области, в которой электронный пучок рассеивается, снижая свою интенсивность до приемлемой величины. В случае транспортировки электронного пучка магнитным полем деструкцию пучка осуществляют ослаблением магнитного поля в промежутке между слоем и подложкой до величины, определяемой из условия:

$$\Omega = \frac{eB}{mC} \leq \frac{2}{\gamma_0} \cdot \omega_e,$$

где  $\Omega$  – электронная циклотронная частота, рад/с;

$\omega_e$  – электронная плазменная частота в промежутке слой-подложка, рад/с;

$\gamma_0$  – релятивистский фактор;

$B$  – магнитное поле, Тл;

$m$  – масса электрона, кг;

$e$  – заряд электрона, Кл;

$C$  – скорость света, м/с.

При выполнении этого условия деструкции нарушается транспортировка пучка, и он рассеивается под действием центробежных и электростатических сил в радиальном направлении. Анализ процесса распространения пучка в промежутке слой-подложка показывает, что минимальная протяжённость зоны деструкции вдоль оси пучка, необходимая для достаточного ослабления прошедшего через слой пучка, определяется формулой:

$$Z_a = 10^{-2} \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{B} \cdot \left( \frac{D}{D_0} \right)^2,$$

где  $B$  – магнитное поле транспортировки, Тл;

$\delta$  – степень деструкции пучка;

$D$  – поперечный размер наносимого слоя, м;

$D_0$  – диаметр пучка, м.

В пределах указанного выше интервала находят оптимальное расстояние, обеспечивающее образование покрытия с требуемыми свойствами.

Способ апробировался при нанесении покрытия на подложку, изготовленную из меди марки М1. Слой, подлежащий расплавлению с испарением, представлял собой алюминиевую фольгу толщиной 100 мкм. Исследования проводились на ускорителе МИГ-1 [4]. Слой облучали сильноточным релятивистским электронным пучком с параметрами: ток пучка  $I_n = 1 - 5$  кА; ускоряющее напряжение  $E_n = 0,3 - 0,5$  МэВ; длительность пучка  $\tau = 1 - 10$  мкс; площадь сечения пучка  $10 \text{ см}^2$ . Расстояние  $Z$  между слоем и подложкой выбирали в соответствии с соотношением  $Z_a < Z < Z_d$ , где  $Z_a$  – протяжённость зоны деструкции;  $Z_d$  – рас-

стояние, на котором происходит каплеобразование.  $Z_d$  определяли из формулы:

$$Z_d = 2 \cdot \frac{q \cdot d^3 \cdot V}{L \cdot \sigma \cdot D}.$$

В условиях опыта  $d = 100$  мкм;  $L_{\text{исп}} = 10,88 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $V = 1600$  м/с;  $\sigma = 0,91$  Н/м;  $D = 0,01$  м;  $q = 5 \cdot 10^{10} - 5 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Поэтому, например, для  $q = 5 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup> расстояние  $Z_d$  равно 1,6 мм, а для  $q = 5 \cdot 10^{12}$  Вт/м<sup>2</sup>,  $Z_d = 160$  мм. Промежуток между слоем и подложкой экранировали от транспортирующего магнитного поля цилиндром из арможелеза толщиной 20 мм.

Магнитное поле транспортировки  $B$  составляло в опытах 0,8 Тл. При  $\delta = 2 - 200$  и  $D/D_0 = 1/6$  протяжённость зоны деструкции составляет  $0,7 - 7$  мм соответственно.

Экспериментально было установлено, что покрытие с наиболее высоким качеством поверхности и хорошим сцеплением с подложкой образовывалось при  $q = 4 \cdot 10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup> и  $Z = 6$  мм. При облучении фольги без дополнительной деструкции остаточного пучка микротвёрдость покрытия уменьшалась. Если расстояние между слоем и подложкой превышает  $Z_d$ , то даже при осуществлении деструкции остаточного пучка нарушается сплошность покрытий из-за каплеобразования в результате развития гидродинамической неустойчивости расплавленного слоя.

Как показали результаты рентгеноструктурного анализа, покрытие, образовавшееся на подложке в результате взаимодействия слоя расплавленного алюминия с медной подложкой, состоит из двух алюминидов  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  и  $\text{CuAl}_2$  с изменёнными параметрами решётки. Их микротвёрдость  $H_{\mu}^{50}$  составляет соответственно 4700 и 5490 МПа, что превышает твёрдость полученных известными способами фаз на 21 и 32 %.

Таким образом, в результате удаления наносимого слоя от подложки и проведения деструкции остаточного пучка появляется возможность совместить высокотемпературный химический синтез со сверхбыстрым охлаждением при больших давлениях. Это позволяет получать и фиксировать в покрытиях метастабильные фазы и структуры.

Ещё одним возможным применением способа является нанесение барьерных слоёв на поверхность подложки. Обычно барьерные слои наносят для предотвращения или ослабления взаимодействия покрытия с подложкой во время его эксплуатации. Однако, при нанесении таких слоёв известными способами они, как правило, плохо сцепляются с поверхностью подложки. Предлагаемый способ позволяет значительно улучшить адгезию и получить на подложке равномерные барьерные слои толщиной 10 – 30 мкм.

Важным преимуществом способа является то, что в качестве наносимых слоёв можно использовать всевозможные сочетания фольг из различных материалов, а также порошковые композиции, наносимые на несущие тонкие плёнки.

**Выводы.** Дистанционной наплавкой с помощью широкоапертурного импульсного электронного пучка можно наносить на поверхность изделий слои самого разнообраз-

ного состава при хорошем сцеплении с подложкой. Сочетание высоких температур и давлений с регулируемой быстротой закалки создаёт новые возможности для осуществления химических реакций с большой энергией активации непосредственно в процессе нанесения покрытия.

#### Библиографический список

1. Скринский А.Н. и др. Высокопроизводительная наплавка и оплавление порошковых покрытий пучком релятивистских электронов // ДАН, 1985. – Т.283. – № 4. – С. 865-869.
2. Шеремет В.И., Уваров В.Т., Ткач Ю.В., Пашченко А.В. Способ нанесения покрытий на подложку.-1989.
3. Ефимов Ю.В. и др. Сверхбыстрое охлаждение металлических расплавов при высоком внешнем давлении // Физика и химия обработки материалов, 1988. – №6, С. 97-101.
4. Ткач Ю.В., Уваров В.Т., Гадецкий Н.П. и др. Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к.п.д. // Препринт ХФТИ 84-30. – г. Харьков, 1984.

#### DISTANT MELTING OF MATERIALS ON ARTICLES SURFACES BY IMPULS HIGH CURRENT ELECTRONS BEAM

*V.V. Pashchenko, A.G. Ponomarjov, V.V. Slezov, V.T.Uvarov,  
V.I. Sheremet, B.M. Shyrokov  
(Ukraine, Kharkiv, NSC KhIPhT)*

*The method of coating application allowing to combine high temperature chemical synthesis with superspeedy cooling at large pressures in which electron beam accelerates melted layer in the direction towards cool surface is described. The conditions under which uniform melting up of materials on surface is possible are considered.*

УДК 621.039

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЦ, ЭКСТРАГИРОВАННЫХ НА ПЛЕНОЧНЫЕ ПЫЛЕПОДАВИТЕЛИ И МАЗКИ ОБЪЕКТА "УКРЫТИЕ"

*О.В. Бородин, В.В. Брык, И.М. Неклюдов  
г. Харьков, ИФГТМТ НИЦ ХФТИ*

*В работе изложены результаты электронно-микроскопических и рентгено-спектрометрических исследований образцов проб, полученных из внутренних помещений объекта "Укрытие" (ОУ).*

**Введение.** В результате аварии 1986 г. на 4 блоке ЧАЭС произошел выброс радиоактивных веществ, которые различными путями попали в производственные помещения. В настоящее время внутри Объекта "Укрытие" (ОУ) бетонные стены и металли-

ческие поверхности загрязнены радиоактивными веществами.

Для проведения мероприятий по стабилизации ОУ необходимо выяснить степень загрязнения адгезированными частицами радиоактивного вещества бетонных и ме-