

*С.Г. Молотков<sup>1</sup>, Д.А. Романов<sup>2</sup>, Е.А. Будовских<sup>2</sup>, А.Ф. Софрошенков<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Кузбасская государственная педагогическая академия

<sup>2</sup> Сибирский государственный индустриальный университет

## АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ГРАНИЦЕ С ОСНОВОЙ<sup>1</sup>

Электровзрывное напыление (ЭВН) покрытий осуществляется многофазной плазменной струей продуктов электрического взрыва проводников. Высокоскоростной плазменный фронт струи нагревает облучаемую поверхность до температуры плавления и выше, а конденсированные частицы продуктов взрыва, летящие в тылу струи со скоростью 100 – 1000 м/с, формируют покрытие. При этом вблизи границы раздела наблюдается взаимное проникновение материалов покрытия и основы [1]. При повторном напылении единичных слоев образование зоны смешивания происходит и на их границах. Вследствие этого покрытия характеризуются низкой пористостью и адгезионно-когезионной связью с основой.

Целью настоящей работы является анализ возможного механизма формирования структуры покрытий на границах раздела при электровзрывном напылении.

Подробности методики электровзрывной обработки поверхности изложены в работах [1, 2]. В настоящей работе исследования покрытий проводили с использованием оптического микроскопа. Перед микроскопическими исследованиями шлифы подвергали химическому травлению.

Формирование зоны смешивания толщиной несколько микрометров на границе покрытий с основой установлено при ЭВН меди на сталь, молибдена и вольфрама на медь. Вблизи границы наблюдаются изолированные включения микронных размеров меди в железной матрице (рис. 1), либо молибдена и вольфрама в медной матрице.

Рассмотрим модель образования зоны смешивания. При нормальном натекании плазменной струи на поверхность происходит разворот плазменного потока. Он увлекает за собой материал покрытия, конденсирующийся на поверхности основы, которая нагрета до температуры плавления. Возникает область параллельного течения двух слоев металла с различными скоростями. Тангенциальный разрыв скорости приводит к гидродинамической неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, образованию вблизи границы слоя турбулентного течения, приводящего к смешиванию материалов

покрытия и основы [3]. Глубина образующейся зоны определяется длиной волны возмущения.

Пусть одна жидкость с плотностью  $\rho_1$ , динамической вязкостью  $\mu_1$  и коэффициентом поверхностного натяжения  $\sigma_1$  заполняет пространство  $\{-\infty < x < \infty, -\infty < y < \infty, z \geq 0\}$  и движется вдоль оси  $Ox$  со скоростью  $v_1$ . Другая жидкость (характеристики  $\rho_2, \mu_2$  и  $\sigma_2$ ) заполняет пространство  $\{-\infty < x < \infty, -\infty < y < \infty, z < 0\}$  и движется вдоль оси  $Ox$  со скоростью  $v_2$ . Колебания границы раздела можно описать с помощью потенциалов скоростей  $\varphi_{1,2}(x, y, z, t)$  и смещения границы раздела двух сред от положения равновесия  $z = \xi(x, y, z, t)$ . Уравнения несжимаемости, кинематические граничные условия и динамические граничные условия, учитывающие перколяцию, при которой элементарные объемы одной среды проникают в другую, соответственно имеют следующий вид [3]:

$$\Delta\varphi_{1,2} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial\xi}{\partial t} + v_1 \frac{\partial\xi}{\partial x} = \frac{\partial\varphi_{1,2}}{\partial z}, \quad z = \xi; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 \left( q^* \xi + \frac{\partial\varphi_1}{\partial t} + v_1 \frac{\partial\varphi_1}{\partial x} \right) + 2 \left( \mu_1 \frac{\partial^2\varphi_2}{\partial x^2} - \mu_2 \frac{\partial^2\varphi_1}{\partial x^2} \right) = \\ & = \rho_2 \left( q^* \xi + \frac{\partial\varphi_2}{\partial t} + v_2 \frac{\partial\varphi_2}{\partial x} \right) + \sigma^* \frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}, \quad z = \xi; \quad (3) \end{aligned}$$

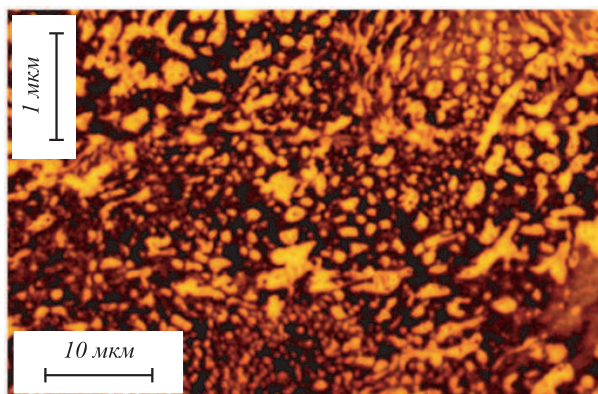


Рис. 1. Характерное изображение структуры на границе электровзрывного покрытия меди на поверхности стальной основы (светлые области – медные включения в железной матрице). Косой шлиф

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 гг. (гос. контракт № 14.740.11.1154) и госзадания Минобрнауки № 2.4807.2011.

где  $q^*$  – эффективное ускорение, соответствующее давлению  $P$ , оказываемому на облучаемую поверхность при ЭВН;  $\sigma^* = |\sigma_1 - \sigma_2|$  – межфазное поверхностное натяжение на границе металлов (правило Антонова).

Представляя искомые функции в виде  $\omega_{1,2} = A_{1,2} \times \exp(ikx - i\omega t)$ ,  $\xi = H \exp(ikx - i\omega t)$  и линеаризуя систему уравнений, получим дисперсионное уравнение, решение которого имеет вид

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{\rho_1 + \rho_2} \left[ k(\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2) - ik^2(\mu_1 + \mu_2) \pm \sqrt{kq^*(\rho_2^2 - \rho_1^2) - (v_1 - v_2)^2 \rho_1 \rho_2 k^2 + \dots} \right. \\ \left. \dots + (\rho_1 + \rho_2) \sigma^* k^3 - (\mu_1 + \mu_2)^2 k^4 \right], \quad (4)$$

где  $\omega$  – частота;  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число;  $\lambda$  – длина волны.

Неустойчивость возникает в случае, когда  $\text{Im}(\omega_{1,2}) > 0$ . Так как при ЭВН как материал формирующегося покрытия, так и материал основы вовлечены в движение, то инкремент определяется также и относительной скоростью  $v_1 - v_2$  движения контактирующих сред. Для каждого ее значения существуют свои длина волны ( $\lambda_0$ ) начала развития неустойчивости и максимальная частота колебаний, определяющие амплитуду возмущения границы раздела. Как только для данной относительной скорости инкремент становится положительным, колебания начинают развиваться с частотой, соответствующей максимальному значению инкремента.

Численное решение уравнения (4) проведено для случая ЭВН покрытия меди на стальную основу при следующих параметрах материалов: для меди  $\rho_1 = 8,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_1 = 1,35 \text{ Н/м}$ ,  $\mu_1 = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $v_1 = 1 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ ; для железа:  $\rho_2 = 7,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\sigma_2 = 1,85 \text{ Н/м}$ ,  $\mu_2 = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,  $v_2 = 0$ .

На рис. 2 представлены зависимости инкремента неустойчивости от длины волны при различных значениях относительной скорости, которые реализуются при ЭВН [2]. Критическая длина волны  $\lambda_0$  составляет величину порядка 1 – 10 мкм, что согласуется с экспе-

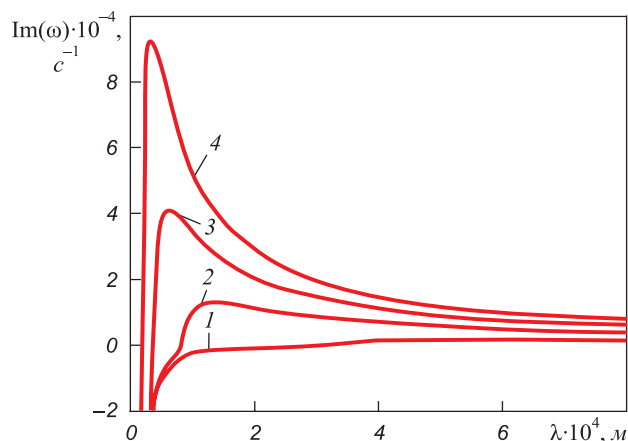


Рис. 2. Зависимость инкремента неустойчивости от длины волны при относительной скорости движения контактирующих сред 5, 10, 15 и 20 м/с (кривые 1 – 4 соответственно)

риментальными данными по глубине зоны смешивания на границе раздела покрытия с основой (рис. 1) и позволяет объяснить ее образование.

**Выводы.** Экспериментально установлено, что при электровзрывном напылении на границе покрытий с металлической основой образуется зона смешивания материалов покрытия и основы. Предложенный механизм ее образования путем развития неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и турбулентного течения расплава на границе раздела подтверждается экспериментальными данными.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романов Д.А., Будовских Е.А., Громов В.Е. // Физика и химия обраб. материалов. 2011. № 5. С. 51 – 55.
2. Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2007. – 301 с.
3. Ткаченко В.И. // Вісник Харківського університету. Серія фізична. «Ядра, частинки, поля». 2010. № 916. С. 4 – 22.

© 2012 г. С.Г. Молотков, Д.А. Романов,  
Е.А. Будовских, А.Ф. Софрошенко  
Поступила 28 ноября 2011 г.