



УДК 539.219.3

© 2007

В. Ф. Мазанко, Е. Н. Храновская, Е. В. Иващенко, С. П. Ворона

Влияние температуры подложки на прочностные характеристики покрытий, полученных методом электроискрового легирования

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Ю. Н. Ковалем)

The influence of temperature of a processable substrate on the strength characteristics of coverings obtained by the method of ESA is investigated by using the microstructural microdurometrical analysis. It is established that a decrease of the temperature of a substrate allows one to increase the thickness of the strengthened layer by 2–5 times and the microhardness by 1.5–2.5 times depending on a material of electrodes. The increase of corrosion stability of coverings by more than 1000 times in relation to a processable material in an unconfigured state is revealed. It is supposed that this effect can be caused by the formation of a liquid-like structure of a covering.

В современной практике машиностроения решение проблемы повышения надежности и долговечности деталей машин и механизмов, работающих в условиях повышенных температур и в агрессивных средах, стараются обеспечить изменением поверхностных свойств, а не объемных, чем существенно расширяют область использования конструкционных материалов. В связи с этим значительный интерес представляет исследование процессов получения упрочняющих коррозионно-стойких покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ).

В то же время существующие в литературе данные касаются, главным образом, технологических аспектов процесса ЭИЛ, а влияние режима нанесения покрытия, в частности температуры обрабатываемой поверхности, на особенности взаимодействия материалов практически не изучено. В связи с этим данная работа посвящена исследованию влияния температуры подложки на прочностные характеристики покрытий, полученных методом ЭИЛ.

Материалы и методики эксперимента. Образцы (катоды) из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, меди и твердого сплава ВТ1 имели форму цилиндра диаметром и высотой 10 мм. В качестве электродов (анодов) применяли сплавы на основе железа: Н32 (32% Ni), Г18Д2 (18% Mn, 2% Cu), 35Г15 (15% Mn), Н28Т2 В2 (28% Ni, 2% Ti, 2% W), а также W,

Ti, Ni и Mo. Легирование образцов осуществлялось на установке “ЭФИ-Элитрон” с энергией единичного импульса 1 Дж, частотой импульсных разрядов 50 Гц, рабочей емкостью $c = 360$ мкФ и длительностью импульса 200 мкс. Образцы обрабатывались при температурах подложки 293 К (на воздухе) и 77 К (в среде жидкого азота). Для обработки в среде жидкого азота образцы помещали в специальный контейнер.

Исследования микроструктуры и микротвердости выполнены с использованием микроскопа МИМ-10 и микротвердомера ПМТ-3 по стандартным методикам. Коррозионная стойкость покрытий определялась путем выдержки образцов в растворе гидроксида натрия (770 г/л) при температуре 460 К в течение 150 ч.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Результаты исследования прочностных характеристик легированных слоев, полученных при различных температурах подложки, представлены в табл. 1, откуда видно, что максимальная толщина упрочненного слоя при обработке на воздухе составляет 24 мкм, минимальная — 15 мкм. Проведение процесса ЭИЛ в среде жидкого азота приводит к заметному увеличению толщины упрочненного слоя по сравнению с обработкой на воздухе. Так, максимальное значение толщины упрочненного слоя достигает 84 мкм, а минимальное — 63 мкм. Следовательно, проведение процесса ЭИЛ в среде жидкого азота позволяет увеличить толщину покрытия в 2–5 раз, в зависимости от материала электродов.

Максимальное увеличение толщины упрочненного слоя наблюдается при легировании медной подложки, минимальное — при легировании подложки из сплава ВТ1. Данный факт можно объяснить таким образом. Проведение процесса ЭИЛ в среде жидкого азота существенно влияет на параметры кристаллической решетки подложки, ее энергетические и механические характеристики, увеличивает градиенты температур и, соответственно, термоупругие напряжения, что, как известно, способствует измельчению зерна подложки и, в свою очередь, приводит к увеличению глубины проникновения атомов легирующего электрода. В результате этого на обрабатываемой поверхности формируется упрочненный слой большей толщины по сравнению с обработкой при комнатной температуре. Максимальное значение микротвердости упрочненного слоя при легировании медной подложки на воздухе составляет 233,98 ГПа, а в среде жидкого азота — 358,6 ГПа. Однако в данном случае представляют интерес не конкретные значения микротвердости легированного слоя, а их отношение при различных температурах подложки. Так, понижение температуры подложки до 77 К позволяет увеличить микротвердость легированного слоя в 1,5–2,5 раза,

Таблица 1. Характеристики покрытий на Cu и ВТ1, полученных при ЭИЛ стальными анодами

Параметры покрытия	Материал электродов			
	Катод — Cu		Катод — ВТ1	
	Н32	Г18Д2	35Г15	Н28Т2 В2
293 К				
Толщина слоя h , мкм ± 3 мкм	15	21	24	21
Микротвердость, H_μ , ГПа ± 1 ГПа	115,9	233,98	193,8	144,9
77 К				
Толщина слоя h , мкм ± 3 мкм	75	84	63	68
Микротвердость, H_μ , ГПа ± 1 ГПа	287,9	358,6	302,7	273,2
$H_\mu(77K)/H_\mu(293K)$	2,48	1,53	1,56	1,89
$h(77K)/h(293K)$	5	4	2,63	3,24

Таблица 2. Коррозионная стойкость покрытий, полученных ЭИЛ стали 12Х18Н10Т анодами из Ni и Mo (V_k основы 0,62 (г/м²) · ч)

Скорость коррозии покрытия	Материал электродов	
	Катод — 12Х18Н10Т	
	Ni	Mo
$V_k^{(\text{азот})}$, г/м ²) · ч	0,0001	0,0009
$V_k^{(\text{комн})}$, г/м ²) · ч	0,0003	0,0013

в зависимости от материала электродов. Различие значений микротвердости при обработке в жидком азоте и при комнатной температуре может быть связано с изменением фазового состава покрытия, происходящего более интенсивно при низких температурах. В сплавах, используемых в качестве анодов, при низких температурах происходят мартенситные превращения, в результате которых на поверхности подложки образуется мартенситная структура, обладающая высокой микротвердостью.

Результаты испытаний на коррозионную стойкость приведены в табл. 2. Анализ данных табл. 2 свидетельствует о том, что оба вида покрытий имеют повышенную коррозионную стойкость по сравнению с основой (сталь 12Х18Н10Т). Коррозионная стойкость увеличивается более чем в 1000 раз. Причем с понижением температуры подложки скорость коррозии уменьшается. Полученный эффект можно объяснить склонностью стали 12Х18Н10Т при взаимодействии Ni и Mo в процессе ЭИЛ к аморфизации [3]. В данном случае имеет место процесс поверхностной аморфизации, позволяющий получать материалы со свойствами, которые характерны для кристаллического состояния в объеме и с комплексом свойств, характерным для аморфного состояния на поверхности — в первую очередь, с высокой коррозионной стойкостью.

Как известно [3], структура аморфных металлов, хотя и является наиболее неупорядоченной среди всех твердых структур, в химическом отношении близка к однородной. Из-за особенностей аморфной структуры такие дефекты, как границы зерен и дислокации, которые характерны для кристаллов и являются центрами развития коррозии, в аморфных металлах не существуют. Кроме того, в процессе ЭИЛ, возможно, происходит закалка металла из жидкого состояния с достаточно большими скоростями охлаждения, в результате в покрытии, имеющем аморфную структуру, отсутствуют дефекты, которые характерны для металлов, охлажденных с обычными скоростями, а именно, в аморфных металлах отсутствует ликвация, включения и другие неоднородности, которые являются дополнительной причиной снижения коррозионной стойкости.

Таким образом, установлено, что понижение температуры подложки позволяет увеличить толщину упрочненного слоя в 2–5 раз, микротвердость — в 1,5–2,5 раза, в зависимости от материала электродов. Повышение коррозионной стойкости покрытий более чем в 1000 раз может быть обусловлено формированием аморфной структуры покрытия. Кроме того, исследование обнаруженных эффектов может существенно расширить наши представления о физических механизмах процессов, протекающих в металлах при ЭИЛ, тем самым дав возможность построить физическую модель данного процесса.

1. *Верхотуров А. Д.* Исследование электродных материалов для электроискрового легирования и принципы их создания. — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 3–38.
2. *Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревуцкий В. М.* Электроискровое легирование металлических поверхностей. — Кичнев, 1985. — 280 с.

3. Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы / Под ред. Масумото Ц. Пер. с япон. – Москва: Металлургия, 1987. – 328 с.
4. Герцирикен Д. С., Мазанко В. Ф., Тышкевич В. М., Фальченко В. М. Массоперенос в металлах при низких температурах в условиях внешних воздействий. – Киев: РИО ИМФ, 1999. – 435 с.

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова
НАН Украины, Киев
НТУ Украины “Киевский политехнический институт”

Поступило в редакцию 30.01.2007

УДК 621.375.826:621.793

© 2007

В. Ю. Хаскин

Комбинированное лазерно-микроплазменное нанесение керамических покрытий на стали

(Представлено членом-корреспондентом НАН Украины И. В. Кривцуном)

A possibility for the ceramic coating deposition using the laser-microplasma technique without the preliminary abrasive jet machining of the part surface is demonstrated. The coverings obtained have high cohesive resistance and are the chemical compounds of a deposited material with iron. These coverings have high resistance to dynamic loads and sufficient thermostability.

Керамические покрытия обладают рядом полезных эксплуатационных свойств, которые обуславливают их применение в промышленности. В первую очередь, это изоляционные свойства, износо- и коррозионная стойкость, а также термостойкость и жаропрочность [1]. Обычно их применяют в медицине для создания защитных покрытий на металлических протезах, для получения изоляционных покрытий на различного рода инструментах, на поверхностях сопел и трубок, контактирующих с горячим газом или плазмой и т. д. Однако при газотермическом нанесении керамических покрытий возникает ряд трудностей, связанных с геометрией напыляемой поверхности, качеством ее подготовки, использованием дорогостоящих подслоев, подбором режима напыления, возможностями оборудования [2, 3].

Полученное в результате газотермического (обычно плазменного) напыления керамическое покрытие наряду с описанными преимуществами имеет и недостатки. Это хрупкость покрытия, опасность его разрушения даже при сравнительно невысоких динамических нагрузках, а также сравнительно невысокая прочность сцепления с подложкой. С ростом толщины покрытия эти недостатки проявляются в большей мере. Для устранения необходимости в применении дорогостоящих подслоев (например, Ni-Al), повышения прочности сцепления с основным металлом и снижения хрупкости за счет диффузии небольшого количества железа основы в покрытие, предлагается использовать лазерно-микроплазменный способ нанесения покрытий, подробно описанный в [4]. При этом технология комбинированного нанесения керамических покрытий будет отличаться от технологии, предложенной в статье [4], из-за различий в поглощении и рассеянии лазерного излучения металлическими и керамическими частицами присадочных материалов [5]. В первом случае частицы