

ЭЛЕКТРОИСКРОВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ, ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Дамнан ИОРДАКИ, мастерант, факультет реальных наук, экономики и окружающей среды, Бельцкий государственный университет имени Алеку Руссо
Научный руководитель: **Павел ПЕРЕТЯТКУ**, доктор, конференциар

Rezumat: *A fost efectuată o analiză detaliată a studiilor privind alierea electro-spark a suprafeței titanului și a aliajelor sale pentru a îmbunătăți proprietățile lor fizico-chimice și caracteristicile de performanță. S-a demonstrat că metoda de aliere electrospark face posibilă îmbunătățirea unor caracteristici importante ale titanului, cum ar fi: rezistența la uzură, rezistența la căldură și stabilitatea la coroziune.*

Cuvinte-cheie: *aliere electrospark, energie de descărcare, eroziune, transfer de masă, formarea stratului de acoperire, uzură, duritate, rezistență la căldură, transformări de fază.*

1. Введение

Теплозащита, высокая износо- и коррозионная стойкость необходимы деталям, работающим при больших температурах, давлениях, скоростях, в агрессивных средах, что характерно прежде всего для авиационной и космической техники, судостроения, энерго- и химического производства. Наиболее широкими возможностями для получения таких деталей или их рабочих поверхностей обладают методы обработки материалов, которые используют концентрированные потоки энергии, например, низкотемпературную плазму, лазерные, электронные и ионные лучи, импульсные разряды и т.п.

Одним из таких методов является электроискровое легирование (ЭИЛ) [1-4]. ЭИЛ основано на явлении электрической эрозии и переноса материала анода на поверхность катода-детали при протекании импульсных (искровых)

разрядов в газовой среде (воздухе, аргоне, азоте и др.). Без специальной подготовки поверхности и объемного нагрева деталей ЭИЛ позволяет формировать покрытия с высокой прочностью сцепления с основой практически из любых токопроводящих материалов – чистых металлов, их сплавов, металлокерамических композиций, тугоплавких соединений (карбидов, нитридов, боридов и т.п.).

Сам процесс ЭИЛ экологически чистый и безопасный, так как осуществляется при напряжении 20-100 В и длительности импульсных разрядов 10^{-6} - 10^{-3} с. При этом толщина формируемых слоев из твердых сплавов составляет ~ 0,01-0,15 мм, а из пластичных и более легкоплавких материалов слой покрытия может достигать $\geq 0,3$ -0,5 мм.

В зоне разряда электроэрозия, массоперенос материала электродов (в паровой, жидкой и твердой фазах), кристаллизация и другие явления протекают в крайне неравновесных условиях, способствующих образованию структур с мелким зерном, высокой плотностью дислокаций, с особым напряженно-деформированным состоянием. Изменяя параметры и условия ЭИЛ, можно регулировать микрометаллургические процессы в этой зоне, проводить направленный синтез тугоплавких и других химических соединений и формировать сложные композиционные покрытия из интерметаллидов, карбидов, нитридов, окислов как за счет материалов электродов, так и элементов межэлектродной среды.

С учетом достаточно широкого применения титана и его сплавов в указанных областях техники и производства была изучена возможность использования ЭИЛ для формирования на образцах и деталях из этих материалов упрочняющих и защитных покрытий.

2. ЭИЛ титана и его сплавов

Один из важных моментов связан с закономерностью электрической эрозии материалов электродов, формированием слоя покрытия на катоде-детали в зависимости от энергии разряда W , межэлектродной среды и природы материалов электродов. Интенсивность эрозии анода и перенос эродированного материала на катод, а также особенности взаимодействия материалов электродов в зоне разряда являются важнейшими факторами, определяющими свойства формируемых поверхностных слоев, а в конечном итоге – и их эксплуатационные характеристики [2-8]. Обработываемыми электродами (анодами) являются тугоплавкие металлы IV-VI и VIII групп (Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta, W) и их карбиды, металлы группы железа (Fe, Co, Ni), а также сплав нихром Х20Н80 и алюминий.

Энергия импульсного разряда существенно влияет на формирование различных параметров поверхностного слоя. Наиболее оптимальные покрытия, которые могут быть рекомендованы в качестве износостойких, образуются при обработке титана Cr, Ta, Co, Ni, а также карбидами хрома, молибдена и вольфрама. Слои, полученные при ЭИЛ в аргоне, гелии и вакууме, всегда имеют меньше дефектов, чем при подобной обработке в воздухе.

При использовании RC-генераторов и вибрирующих электродов-инструментов (ручной вариант ЭИЛ) появляется эффект значительной эрозии титанового катода, особенно на начальном этапе формирования покрытий.

Наиболее интенсивная эрозия обрабатываемой поверхности происходит в процессе ЭИЛ анодами из переходных металлов группы железа (рис. 1а). При ЭИЛ карбидами тугоплавких металлов IV-VI и VIII групп эффект эрозии титанового катода практически отсутствует (рис. 1б). [5]

Когда анодами служат металлокерамические твердые сплавы типа ВК и ТК, изготовленные на основе карбидов вольфрама и титана, которые содержат в качестве связки кобальт, вновь проявляется (повышается) активность титанового катода за счет взаимодействия с кобальтом. Это приводит к появлению эффекта эрозии подложки на начальном этапе ЭИЛ, что необходимо учитывать при обработке деталей из титана и его сплавов, поскольку в результате эрозии могут измениться (уменьшиться) ее геометрические размеры. Эффект эрозии титанового катода может быть существенно уменьшен или полностью устранен путем предварительной обработки поверхности подложки графитом или серебром при относительно небольших энергиях разряда ($W \sim 0,05-0,1$ Дж) [5, 8, 9, 10].

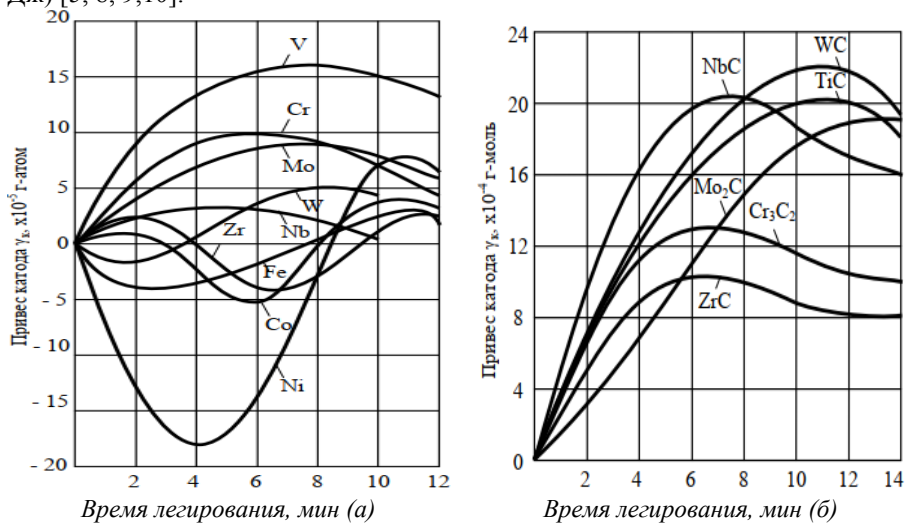


Рис. 1. Зависимость привеса титанового катода от времени электроискрового легирования некоторыми переходными металлами IV-VI групп (а) и их карбидами (б) (4-й режим установки ЭФИ-10М, $W \sim 1,0$ Дж).

3. Некоторые особенности ЭИЛ титана алюминием и никелем

Детальное изучение показателей качества поверхностных слоев (шероховатости, равномерности, сплошности, микротвердости и т.д.) позволило выяснить, что в общем при ЭИЛ титана переходными металлами IV-VI и VIII групп их карбидами не удается полностью достигнуть того комплекса свойств, которые необходимы для защиты поверхности деталей, работающих, например, при воздействии агрессивных сред, высокотемпературной газовой коррозии и т.п. В этом аспекте, например, Al, Ni, могут быть перспективными для создания защитных и упрочняющих покрытий на титане методом ЭИЛ.

Рабочие электроды из Al и Ni представляли собой бруски квадратного сечения (5x5x15 мм) или проволоку диаметром 1,5-2,5 мм. Для подложки необходимо использовать йодидный технический титан марки ВТ1, а также сплавы ВТ-5, ВТ3-1. Эксперименты оятльо осуществлялись с помощью установки типа ЭФИ-10М. Электроду-инструменту должна сообщаться вибрация частотой 100 Гц или вращение вокруг горизонтальной оси (при использовании проволоки) со скоростью 100–1250 об/мин [5, 7, 12].

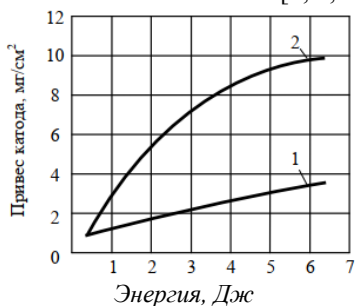


Рис. 2. Зависимость привеса катода из технического титана ВТ1 от энергии разряда при электроискровом легировании алюминием: 1 – вибрирующий электрод; 2 – вращающийся электрод.

Если предположить, что в процессе разряда основная масса эродированного материала анода переносится на катод, то приведенная на рис. 2 зависимость (кривая 1) показывает, что количество алюминия, выбрасываемого с анода и осажденного на катоде при вибрирующем электроде, прямо пропорционально энергии разряда и определяется известным [3] соотношением:

$$\gamma = k n W, \quad (1)$$

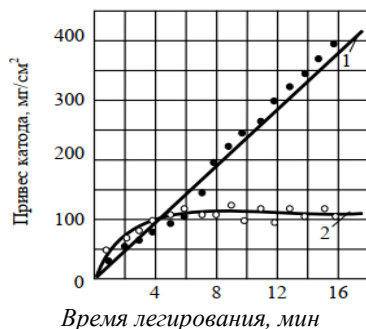


Рис. 3. Зависимость привеса катода из титана ВТ1

где k – коэффициент пропорциональности; n – количество разрядов (в нашем случае – время легирования); W – энергия разряда.

Для вращающегося электрода это соотношение принимает вид

$$\gamma = 2,07 W^{0,85}, \quad (2)$$

Следовательно, интенсивность процесса переноса возрастает. В этом случае интенсивный перенос связан с особенностью движения электрода-анода

относительно поверхности катода. Конец анода на небольшом участке совершает движение по касательной к поверхности катода. В момент соприкосновения его с этой поверхностью образовавшаяся капля расплавленного металла, отрываясь от положительного электрода, «размазывается по поверхности катода». Другим фактором, влияющим на интенсивность переноса, очевидно, является дополнительный нагрев контактных зон за счет тока короткого замыкания при более длительном (чем при вибрации) контакте анода с катодом. Если данный процесс развернуть во времени (рис. 3а), то еще резче выявляется количественное различие в формировании покрытия при вращении и вибрации легирующего электрода. При вибрации анода кривая зависимости привеса катода от времени имеет обычный, классический вид – наличие максимума или порога насыщения, характерных для большинства пар металлов [3, 4], а следовательно, ограничена и толщина слоя. При вращении анода перенос алюминия идет равномерно и непрерывно (прямолинейная зависимость), поэтому толщина слоя покрытия почти не ограничена (рис. 3б). Естественно, с возрастанием скорости вращения до определенной величины ($n = 750$ об/мин) количество перенесенного на катод алюминия увеличивается (рис. 4). Уменьшение привеса катода при больших скоростях ($n = 1250$ об/мин), очевидно, связано с распылением материала анода за счет центробежных сил и малого времени касания между электродами.

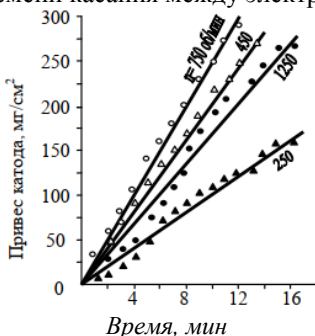


Рис. 4. Зависимость привеса катода во времени от числа оборотов вращающегося электрода-анода при электроискровом легировании титана алюминием. Установка ЭФИ-10М, 6-й режим.

4. Формирование износостойких покрытий на титане и его сплавах

Из-за высоких адгезионных свойств как на воздухе, так и в вакууме для титановых деталей, работающих в узлах трения, характерна склонность к схватыванию при трении. Для устранения этого недостатка применяются различные методы формирования на поверхности титановых деталей покрытий, повышающих их триботехнические характеристики. Уже в первых работах по ЭИЛ [2-4, 14] были показаны широкие возможности этого метода для повышения износостойкости деталей узлов трения.

Исследователь В.В. Михайлов на примере ЭИЛ титанового сплава ОТ4 изучил характеристики трения покрытий, полученных при обработке анодами

из переходных металлов (Co, Cr, Al, Ag, Ni), нихромового сплава (X20H80) и ряда тугоплавких соединений (TiC, ZrC, NbC, Cr₃C₂, Cr₃C₂ + 15%Ni, WC, (TiCr)B₂) [5]. Испытание на трение и износ проводилось по схеме торцевого трения образцов с формой втулок с наружным диаметром 15 и внутренним 8 мм в вакууме 10-5 мм рт.ст в диапазоне температур 20-700оС и при комнатной температуре на воздухе на установке, описанной в работе В.В. Сычева и др. [15]. При испытании на воздухе средняя скорость скольжения была 0,02 м/с, удельная нагрузка – от 10 до 40 кГс/см². Скорость изнашивания определялась отношением величины линейного износа (мкм) к времени трения (час). При испытаниях на воздухе контртелом служил карбид титана с микротвердостью ~ 3000 кГс/мм² и чистотой поверхности Ra ~ 0,3 мкм. ЭИЛ осуществлялось на ручной установке типа ЭФИ при W ~ 1-6 Дж. После ЭИЛ испытуемые поверхности доводились, а затем прирабатывались до полного взаимного прилегания.

5. Выводы

Повышение жаростойкости титана и его сплавов возможно с помощью достаточно простого и эффективного варианта ЭИЛ, который при уже разработанном оборудовании и установленном диапазоне энергетических параметров технологического процесса обработки позволяет формировать покрытия, повышающие жаростойкость указанных выше материалов в 3-20 и более раз [5, 7, 13].

Столь значительное увеличение стойкости к окислению (мы подразумеваем процесс ЭИЛ в воздухе) обусловлено прежде всего выбором электродных материалов (электродной пары анод–катод), при взаимодействии которых между собой и с элементами межэлектродной среды в процессе ЭИЛ в формируемом слое синтезируются высокотемпературные фазы и структуры.

В этом плане оптимальные результаты могут быть получены при использовании Al, интерметаллида NiAl, комбинированных слоев Cr+Al, Ni+Al, а также тугоплавких соединений (Ti5K6, VK6M, сплавов W-Cr-Co и других) [5, 7, 13, 16, 17, 18]. В ряду ранжирования по повышению жаростойкости на первом месте стоит Al. В то же время этот материал технологически удобен для изготовления простых и сложных профилированных анодов (проволочных, стержневых, дисковых и т.п.). Естественно, возникает вопрос о возможности использования электродной пары Ti-Al для формирования высокотемпературных защитных слоев на других материалах. В этом случае, очевидно, эффект защиты дополнительно будет зависеть как от взаимодействия в зоне разряда электродных материалов Ti-Al между собой и с элементами межэлектродной среды, так и от их особенностей при взаимодействии с материалом подложки.

Библиография:

1. ЛАЗАРЕНКО, Б.Р., *Способ нанесения металлических покрытий*. А.С. 89933 СССР/Б.И. 1951, (12). С. 2.
2. ЛАЗАРЕНКО, Н.И., *Изменение исходных свойств поверхности катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде*. Электроискровая обработка металлов. М.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 70-94.

3. ЛАЗАРЕНКО, Н.И., *Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами*. Электроискровая обработка металлов. М.: Изд-во АН СССР. 1960. (2). С. 36-66.
4. ЛАЗАРЕНКО, Н.И., *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. М.: Машиностроение, 1976. 47 с.
5. МИХАЙЛОВ, В.В., *Исследование особенностей электроискрового легирования титана и его сплавов*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев, Институт проблем материаловедения АН УССР. 1977. 19 с.
6. САМСОНОВ, Г.В., ВЕРХОТУРОВ, А.Д., БОВКУН, Г.А., СЫЧЕВ, В.С., *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Киев: Наукова думка, 1976. 220 с.
7. ГИТЛЕВИЧ, А.Е., МИХАЙЛОВ, В.В., ПАРКАНСКИЙ, Н.Я., РЕВУЦКИЙ, В.М., *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
8. ВЕРХОТУРОВ, А.Д., *Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании*. Владивосток: Дальнаука, 1995. 322 с.
9. САМСОНОВ, Г.В., ПРЯДКО, И.Ф., ПРЯДКО, Л.Ф., *Конфигурационная модель вещества*. Киев: Наукова думка, 1972. 271 с.
10. МИХАЙЛОВ, В.В., ПАСИНКОВСКИЙ, Е.А., БАЧУ, К.А., ПЕРЕТЯТКУ, П.В., *К вопросу электроискрового легирования титана и его сплавов*. Электронная обработка материалов. 2006, (3), 106-111.
11. МИХАЙЛОВ, В.В., НОСКОВ, В.В., КУЛАКОВ, В.П., ПЕРЕТЯТКУ, П.В., *Способ электроэрозсионного нанесения покрытий*. А.С. 1362577 СССР Кл. В23 Н9/00 № 4069067.
12. ЛАЗАРЕНКО, Б.Р., ГИТЛЕВИЧ, А.Е., ФУРСОВ, С.П., МИХАЙЛОВ, В.В., МАРКУС, М.М., *Некоторые особенности электроискрового легирования титана алюминием и никелем*. Электронная обработка материалов. 1974, (1), 29-32.
13. ВЕРХОТУРОВ, А.Д., РОГОЗИНСКАЯ, А.А., ТИМОФЕЕВА, И.И., *Формирование упрочненного слоя при электроискровом легировании сталей и титановых сплавов*. Киев: Общество «Знание», УССР, 1979. 27 с.
14. ЧАТЫНЯН, Л.А., ЛАЗАРЕНКО, Н.И., *Повышение износостойкости поверхностей трения, работающих при высоких температурах, электроискровым легированием*. Электронная обработка материалов. 1966, (2). 33-38.
15. СЫЧЕВ, В.В., ТКАЧЕНКО, Ю.Г., КОВАЛЬЧЕНКО, М.С., *Установка для исследования высокотемпературных процессов трения и износа в вакууме и газовых средах*. Физико-химическая механика материалов. 1971, (5), 77-78.
16. МУЛИН, Ю.И., ВЕРХОТУРОВ, А.Д., ВЛАСЕНКО, В.Д., *Электроискровое легирование поверхностей титановых сплавов*. Перспективные материалы. 2006, (1), 79-85.
17. МУЛИН, Ю.И., *Повышение износо- и жаростойкости поверхностей титановых сплавов*. Вестник машиностроения. 2006, (8), 63-68.
18. ВЕРХОТУРОВ, А.Д., МУХА, И.М., *Технология электроискрового легирования металлических поверхностей*. Киев: Техника, 1982. 181 с.