

В.В. Михайлов, К.А. Бачу*, Е.А. Пасинковский, П.В. Перетятку

К ВОПРОСУ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ТИТАНА И ЕГО СПЛАВОВ

*Институт прикладной физики АН РМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова
*Ясский технический университет,
бул. Манжерон, 63, г. Яссы, Румыния*

В первых работах по электроискровому легированию (ЭИЛ) титана и его сплавов с применением генераторов импульсов типа RC и вибрирующих электродов-инструментов был обнаружен эффект сильной эрозии титанового катода, особенно на начальном этапе проведения процесса [1]. Наиболее ярко этот эффект проявляется при легировании анодами из переходных металлов, и в первую очередь никелем (рис. 1). Из рисунка видно, что практически на протяжении 8 минут эрозия титанового катода преобладает над переносом материала анода и лишь после этого начинается наращивание слоя покрытия.

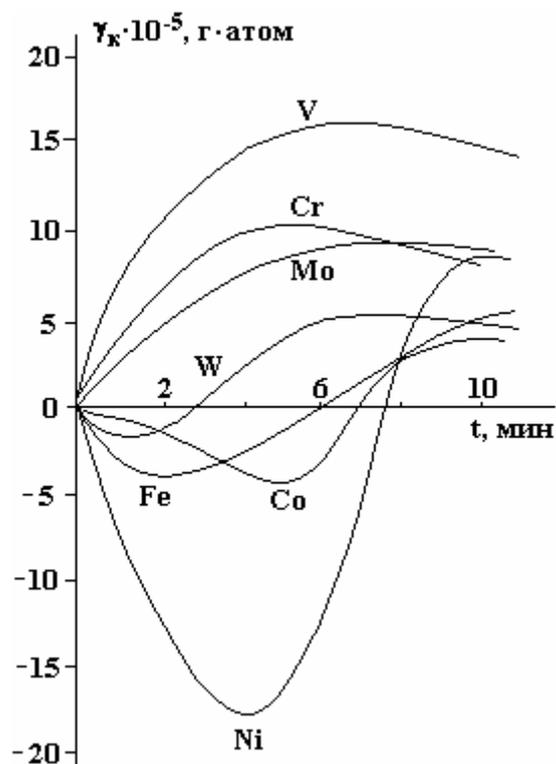


Рис. 1. Зависимость прироста титанового катода от времени электроискрового легирования некоторыми переходными металлами IV, VI и VIII групп (4-й режим установки ЭФИ-10М, вибрирующий анод)

Такой характер процесса ЭИЛ титана никелем связан, возможно, с особенностью электронной структуры данной пары материалов. Известно [2], что никель, являясь типичным акцептором электронов, стремится к достройке до конфигурации с 10 электронами на d -уровне. С другой стороны, титан, являясь активным донором, стремится к отдаче двух электронов и образованию устойчивой конфигурации d_0 .

В результате направленного выброса материала анода на катод при искровом разряде происходит интенсивный электронный обмен между атомами материалов электродов, который сопровождается экзотермическими эффектами типа «вспышек» и продолжается до тех пор, пока поверхность катода еще остается «свежей» (не полностью поражена электрическими разрядами). Этот период характеризуется наибольшей эрозией и предполагается, что весьма активное взаимодействие никеля с титаном в момент соприкосновения приводит к распылению катода. В дальнейшем, когда вся поверхность катода подвергается воздействию разрядов, интенсивность вспышек понижается, что, очевидно, объясняется уменьшением доли свободных, нелокализованных электронов.

Другими словами, происходит обмен электронами возбужденных атомов таким образом, что образуются более стабильные по сравнению с начальными электронные структуры в зоне обработки. На последующем этапе обработки отмечается увеличение веса катода. Это означает, что перенос материала анода преобладает над эрозией катода. Подобное явление, но менее эффективное наблюдается при легировании титана железом и кобальтом, что связано с понижением акцепторной способности от кобальта к железу.

Электроискровое легирование металлами IV–VI групп характеризуется меньшей эрозией катода, что говорит об уменьшении их активности при взаимодействии с титаном. Еще меньшей активностью при взаимодействии с титановым катодом обладают карбиды металлов IV–VI групп. При этом не наблюдается эрозии катода (рис. 2). Отметим, что такой характер формирования поверхностного слоя на титане при ЭИЛ указанными материалами остается неизменным на всех режимах обработки с энергией разряда 0,1, 1,0 и 6,0 Дж соответственно. Единственным отличием в этом случае является сокращение времени легирования.

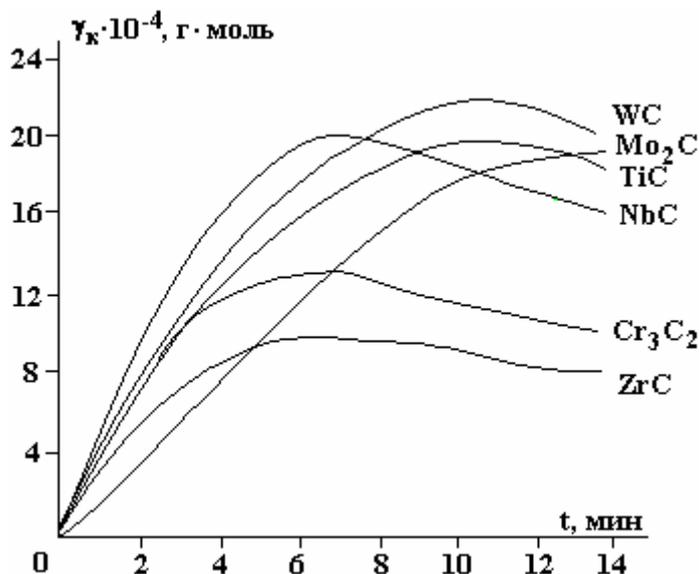


Рис. 2. Зависимость привеса титанового катода от времени электроискрового легирования некоторыми карбидами переходных металлов IV–VI групп (4-й режим установки ЭФИ-10М, вибрирующий анод)

Однако при использовании в качестве анодов ЭИЛ известных металллокерамических твердых сплавов типа ВК и ТК, изготовленных на основе карбидов вольфрама и титана, которые содержат в качестве связки кобальт, активность титанового катода вновь повышается именно за счет взаимодействия с кобальтом. Это приводит к увеличению эрозии на начальном этапе электроискрового легирования, что необходимо учитывать при упрочнении деталей из титановых сплавов, поскольку в результате эрозии титановой подложки могут измениться (уменьшиться) ее геометрические размеры.

ЭИЛ титана и его сплавов исследовалось не только по классической схеме легирования вибрирующими анодами, но и с применением вращающихся электродов–инструментов с электрододержателями в виде диска с закрепленными на нем проволочными электродами диаметром 1,5 мм из никеля, железа и, для сравнения, из алюминия на режимах с той же энергией электрических импульсов [1]. Обрабатываемые электроды вращались в плоскости, перпендикулярной поверхности титанового катода, со скоростью 800–1000 об/мин.

Однако, несмотря на то что в начале процесса ЭИЛ также наблюдалась бурная реакция взаимодействия материала анодов из никеля, железа и кобальта с титановой подложкой, на графике зависимости прироста катода от времени обработки этот момент не зафиксирован (рис. 3).

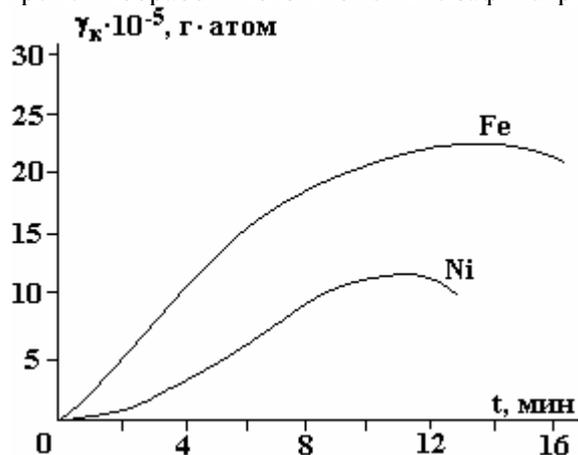


Рис. 3. Зависимость прироста титанового катода от времени электроискрового легирования железом и никелем (4-й режим установки ЭФИ-10М, вращающийся анод в плоскости, перпендикулярной поверхности катода)

Можно предположить, что подобная картина формирования слоя покрытия на титане связана с видом движения анодов (обрабатываемых электродов). Проволочный электрод, вращаясь в плоскости, перпендикулярной поверхности катода, приближается к нему по касательной. По достижении пробивного расстояния происходят разряд и выброс на катод эродированного материала анода. Далее конец анода соприкасается с поверхностью катода и какое-то время скользит по ней, «размазывая» жидкую фазу, образовавшуюся в результате разряда и дополнительной порции жидкого металла, которая образуется за счет джоулева тепла, выделившегося в зоне контакта анода с катодом. Длительность контакта анода с катодом в несколько раз больше, чем в случае вибрирующего анода. Возможно, этот фактор оказывает влияние на «подавление» эффекта сильной эрозии титанового катода при ЭИЛ металлами группы железа, вследствие чего формирование слоя покрытия происходит в более благоприятных условиях.

Для проверки предположения авторами работы был проведен эксперимент с соблюдением всех прочих условий, но при взвешивании катода на аналитических весах через каждые 15 с. При этом установлено, что при ЭИЛ вращающимися анодами имеет место бурная реакция взаимодействия анода с катодом, но в силу высказанных выше предположений этот промежуток времени составляет чуть больше минуты (рис. 4), после которого начинается наращивание слоя покрытия, продолжающееся также с большей скоростью, чем при применении вибрирующего анода.

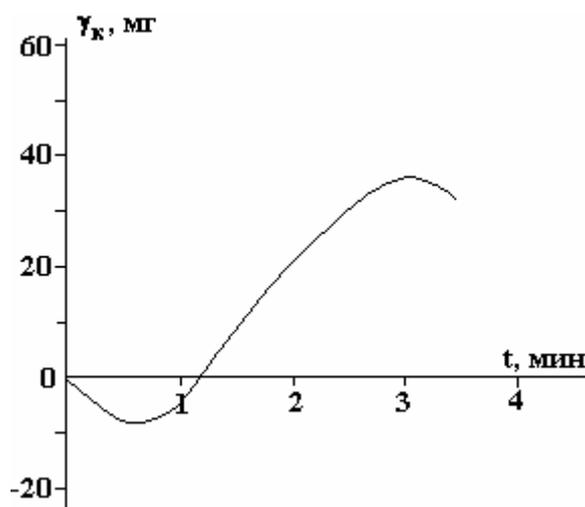


Рис. 4. Зависимость прироста массы титанового катода от времени ЭИЛ вращающимися проволочными электродами из никеля (4-й режим установки ЭФИ-10М)

Тщательный анализ результатов экспериментов с вибрирующими и вращающимися в плоскости, перпендикулярной поверхности катода, обрабатываемыми электродами позволил установить, что при ЭИЛ вращающимися электродами невозможно четко локализовать зону обработки. В процессе работы проволочные электроды зачастую при ударе о поверхность катода или при перегреве деформируются и при частых изгибах ломаются.

Поэтому при разработке технологии упрочнения ответственных деталей из титановых сплавов необходим комплексный подход. С одной стороны, нужно учитывать природу материалов при выборе обрабатываемых электродов с тем, чтобы свести к минимуму эффект сильной эрозии титановой подложки, и, с другой – снизить его за счет технологических приемов: вида и скорости движения обрабатываемых электродов, частоты следования электрических импульсов, энергии разряда, последовательности обработки различными электродами с разной химической активностью и т.д.

Для этого на примере двух титановых сплавов – ВТ9 и ВТ20, широко применяемых в технике, были проведены детальные исследования процесса ЭИЛ с использованием РС- и разобренных генераторов электрических импульсов и различных типов электродов-инструментов (вибрирующих и вращающихся).

Чтобы исключить субъективный фактор, ЭИЛ осуществлялось на действующем макете механизированной установки (специально разработанном для этих целей) со стабилизацией процесса при автоматическом регуляторе точного поддержания межэлектродного промежутка. За основу были взяты серебро, графит, хром и твердый сплав Т15К6. Серебро и графит, как слабо взаимодействующие с титаном, выбирались для пассивации и создания на титановой подложке барьерных слоев, а хром и металлокерамический твердый сплав – для получения поверхностных слоев с высокой твердостью.

Для вибрирующих электродов-инструментов обрабатываемыми электродами служили бруски размером 3x4x40 мм, а для вращающихся электродов-инструментов – стержни диаметром 2–6, длиной 40 мм. Кроме того, серия экспериментов проводилась электродом в виде диска диаметром 16 мм и толщиной 2 мм из графита и Т15К6. Катодами служили втулки диаметром 30, шириной 15 и толщиной стенки 3 мм из титановых сплавов ВТ9 и ВТ20.

ЭИЛ осуществлялось в диапазоне частот следования электрических импульсов (200–2000 Гц). Для исключения отрицательного влияния кислорода, способствующего образованию хрупких окислов, часть экспериментов проводилась в среде аргона марки А, который подавался в зону обработки через специальное дозирующее устройство при избыточном давлении 0,1 атм и расходе ~ 0,5 л/мин.

Изучение динамики эрозии анода (обрабатываемого электрода) и формирования покрытия на катоде проводилось по традиционной схеме и заключалось в фиксировании на аналитических весах расхода анода и прироста катода через определенные промежутки времени (15 и 30 с) при обработке одной и той же поверхности и построении графиков $\gamma_a = f(t)$ и $\gamma_k = f(t)$, где γ_a – количество эродированного материала анода за время ЭИЛ; γ_k – общий прирост массы катода за это же время; t – время ЭИЛ данной поверхности. Энергия электрических импульсов изменялась от 0,1 до 3,0 Дж.

Результаты предварительных экспериментов показали, что при ЭИЛ вибрирующими электродами-инструментами возможно нанесение электроискровых покрытий толщиной до 30–35 мкм со сплошностью 90–95% и при производительности до 1,5 см²/мин. При ЭИЛ вращающимся электродом-инструментом с осевым электродом из Т15К6, расположенным по нормали к обрабатываемой поверхности, были получены равномерные, высокой сплошности (до 98%) слои, максимальная толщина которых достигала 18–20 мкм. При этом наблюдалась значительная неустойчивость процесса: торцевая часть электрода вместе с нанесением материала «шлифует» покрытие благодаря своей высокой твердости.

В связи с этим проводились эксперименты при расположении осевого электрода под разными углами к нормали. Наиболее устойчивый процесс ЭИЛ обеспечивается при углах к нормали от 12 до 30° [3]. В этом случае эпюра контакта обрабатываемого электрода с деталью представляет собой тонкую линию шириной 0,2–0,5 мм. Плотность тока в столь узком контакте значительно выше, чем при расположении обрабатываемого электрода по нормали к поверхности катода, вследствие чего и температура в этом месте выше, что приводит к увеличению количества эродированного материала анода и соответственно к росту толщины сформированного покрытия.

В дальнейшем, для снижения эрозии титанового катода ЭИЛ проводили по следующей схеме. Вначале поверхность, подлежащая легированию, обрабатывалась графитовым или серебряным анодом в режиме энергии 0,1 Дж с удельным временем 1 мин/см² для пассивации поверхности катода. После чего легирование осуществлялось анодом из Т15К6 с таким же удельным временем обработки, но при энергии электрических импульсов, равной 0,5 Дж.

Полученные результаты показали, что ЭИЛ по такой схеме гораздо более эффективно, так как позволяет значительно снизить эрозию титанового катода на начальном этапе процесса и сформировать равномерные по толщине электроискровые покрытия. Максимальная толщина покрытий из твердого сплава Т15К6 достигала ~ 50 мкм.

В этом же плане ряд экспериментов проводился с оригинальным электродом-инструментом в виде дисков из графита или твердого сплава Т15К6 диаметром 16 и шириной 3 мм. Дисковый электрод размещался таким образом, чтобы ось его вращения была параллельна оси цилиндрического образца, а процесс ЭИЛ в одном случае проходил так, чтобы дисковый электрод вращался от собственного привода со скоростью 250–300 об/мин или против вращения катода-детали, а в другом – что бы он отключался от привода и приводился во вращение за счет трения с обрабатываемой деталью. В последнем варианте процесс ЭИЛ отличается более высокой стабильностью даже в отсутствие электронного регулятора величины межэлектродного зазора. При этом постоянство рабочего тока поддерживалось в течение долгого времени (~ 35–40 мин).

Микроструктурный анализ образцов с покрытиями, полученными при упомянутых выше вариантах ЭИЛ, показал, что при предварительной пассивации поверхности титана химически менее активными материалами, чем титан (такими, как графит, серебро), а затем при обработке электродом из никеля в указанном режиме были получены покрытия более высокого качества, чем в случае обработки без пассивации.

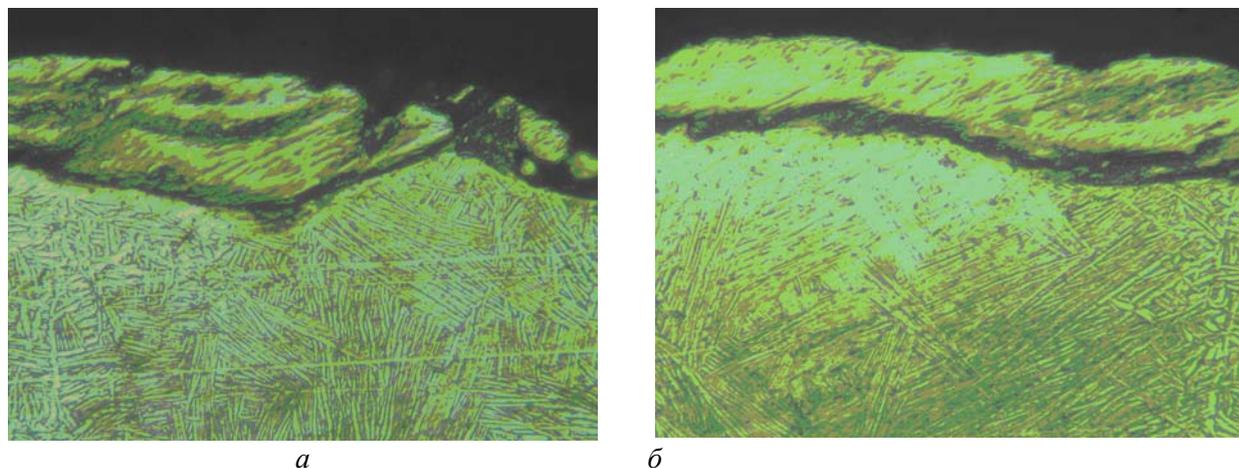


Рис. 5. Микроструктура образца титанового сплава BT20, подвергнутого электроискровому легированию без предварительной пассивации поверхности графитом (а) и при пассивации ее в режиме энергии разряда 0,3 Дж (б). $\times 500$

На рис. 5 представлены микрофотографии зоны ЭИЛ без предварительной пассивации поверхности титана и при ее пассивации в чистовом режиме. Из рисунка видно, что при обычном ЭИЛ в приповерхностных слоях титанового катода очень четко виден результат эффекта сильной эрозии. На начальном этапе в результате взаимодействия никеля с титаном происходит сильная эрозия подложки с образованием глубоких лунок. Далее по мере снижения активности поверхности за счет образования окислов, твердых растворов и т.п. начинается процесс нанесения покрытия: образовавшиеся лунки заполняются эродированным материалом обрабатывающего электрода, сформированные покрытия неравномерны по толщине и имеют много дефектов в виде микротрещин.

В то же время, когда вначале титановая поверхность обыскривалась графитовым электродом в чистовом режиме 0,3 Дж, а основной процесс ЭИЛ проходил в режиме энергии разряда 1,0–1,2 Дж полученные слои обладали более высоким качеством: равномерны по толщине, меньше микротрещин и больше сплошности (97–98%) (рис. 5,б).

Не менее интересные результаты получены при ЭИЛ одним и тем же графитовым электродом в виде стержня диаметром 5 мм, вращающимся со скоростью 1000 об/мин, но с предварительным этапом пассивации поверхности в режиме низкой энергии разряда, составляющей 0,2–0,3 Дж при частоте следования импульсов 1500–2000 Гц с последующим ЭИЛ в режиме энергии 1,0–1,2 Дж при той же частоте следования импульсов. В результате обработки на титане формируется равномерный слой темно-серого цвета твердостью 750–900 кгс/мм², толщиной 12–15 мкм. Рентгеновский анализ показал наличие в слоях фаз карбида титана (TiC), рутила (TiO₂) и свободного графита. Можно ожидать, что слои с подобной структурой отличаются высокой износостойкостью.

В заключение была проведена оптимизация технологических режимов легирования внутренних поверхностей для моделей реальных деталей из титанового сплава ВТ20 в диапазоне диаметров 62–140 мм.

1). Скорость вращения детали.

Скорость вращения детали выбиралась такой, чтобы можно было обеспечить смещение обрабатывающего электрода на $\frac{1}{4}$ диаметра образованной лунки [4] за время, прошедшее между двумя последующими разрядами. При этом происходило необходимое перемещение расплавленных и размягченных зон материала обоих электродов, перемешивание и их взаимное проникновение друг в друга, что обеспечивало уменьшение шероховатости поверхности.

Из условий обеспечения обработки всех типоразмеров деталей в указанном диапазоне диаметров 62–140 мм был разработан механизм вращения заготовки с частотой 0,5–10 об/мин.

2). Скорость вращения обрабатывающего электрода.

Вращающийся электрод-инструмент обеспечивал вращение обрабатывающего электрода в диапазоне частот 200–2000 об/мин, однако наиболее оптимальная частота вращения, при которой происходит устойчивый процесс ЭИЛ, составляет 800–1000 об/мин. При большей частоте усиливается эффект «шлифования» поверхности торцом твердосплавного электрода из Т15К6, а при меньшей – из-за частого схватывания обрабатывающего электрода с заготовкой нарушается устойчивая работа генератора электрических импульсов и самого электрода-инструмента.

3). Скорость перемещения обрабатывающего электрода вдоль обрабатываемой поверхности.

Обычно при реализации механизированного процесса ЭИЛ перемещение электрода следует равномерно вдоль обрабатываемой поверхности. Таким образом, обработка осуществляется по винтовой линии. В этом случае предъявляются высокие требования к устойчивости работы механизмов вращения детали и перемещения электрода-инструмента.

При выполнении работы применялся механизм скачкообразного, дискретного перемещения обрабатывающего электрода. При совершении одного оборота детали обрабатывающий электрод смещается на $\frac{1}{4}$ или $\frac{1}{2}$ диаметра электрода, и таким образом реализуется принцип ЭИЛ, описанный в работе [4], при котором нанесенные покрытия – наилучшего качества.

Таким образом, комплексные исследования электроискрового легирования титановых сплавов ВТ9 и ВТ20 электродами из переходных металлов IV–VI и VIII групп, а также алюминием, серебром, графитом и твердым сплавом Т15К6 позволили установить основные закономерности процесса и предложить решение проблемы интенсивной эрозии катода предварительной пассивацией электродами из графита и серебра в режимах электрических импульсов порядка 0,1–0,3 Дж, после которой проводится обработка твердосплавным электродом из Т15К6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов В.В. Особенности электроискрового легирования титана и его сплавов: Автореф. дис.канд. техн.наук. Киев, 1978.
2. Самсонов Г.В., Прядко Н.Ф., Прядко Л.Ф. Конфигурационная модель вещества. Киев: Наукова думка, Киев, 1972.
3. А.с. 1362577 СССР, М., Кл.В 23 Н 9/00. Способ электроэрозионного нанесения покрытий / Михайлов В.В., Носков Ю.Г., Кулаков В.П., Перетятку П.В. №4069067, Заявлено 20.05.1996.
4. Лазаренко Н.И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами // Электроискровая обработка металлов, изд. АН СССР. Вып. 2. 1960.

Поступила 05.04.06

Summary

Analysis of scientific works on electro-spark alloying of titanium and its alloys have been conducted and unresolved problems in this area have been outlined. Complex investigations of the process of electro-spark alloying of titanium alloys ВТ9 and ВТ20 have been carried out. As a result, a new method of decreasing of erosion of titanium cathode (part) by means of preliminary passivation by silver and graphite anodes at the mode when the energy of discharge is 3–4 times less in comparison with a real process, have been proposed.