

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.316.723.2

DOI: 10.17223/00213411/68/5/1

Расчет динамических характеристик линеаризованной модели процесса микродугового оксидирования*А.Д. Семёнов¹, Е.Д. Шкурина¹, Е.А. Печерская¹,
П.Е. Голубков¹, В.С. Александров¹, Д.В. Якушов¹¹ Пензенский государственный университет, г. Пенза, Россия

Исследование посвящено разработке имитационной модели процесса микродугового оксидирования. Модель позволяет с высокой точностью определить электрические параметры схемы замещения гальванической ячейки (сопротивление и емкость покрытия) методом параметрической идентификации, и с их помощью воспроизвести осциллограммы тока и напряжения, т.е. обеспечить возможность «виртуального эксперимента» без использования технологического оборудования. Такой подход к моделированию позволяет сократить затраты на отработку технологии получения оксидокерамических покрытий и служит основой для создания цифрового двойника процесса микродугового оксидирования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, математическая модель, линеаризованная модель, электрическая схема замещения гальванической ячейки, параметрическая идентификация.

Введение

В настоящее время с целью защиты от износа и коррозии применяется модифицирование поверхности вентильных металлов методом микродугового оксидирования (МДО) [1–3]. Получаемые в результате этого процесса покрытия обладают перспективными физическими и химическими параметрами, что обуславливает их широкое использование в различных отраслях промышленности: в машино- и приборостроении, в изделиях авиационно-космической техники, медицинского назначения и во многих других направлениях [4–6]. Основные конкурентные преимущества микродуговых покрытий связаны с сочетанием их уникальных характеристик, таких как высокие значения износостойкости, микротвердости и коррозионной стойкости [7, 8], а также с возможностью получения требуемых параметров, в том числе толщины, пористости [9, 10].

Главными проблемами технологии МДО в настоящее время являются повышение энергоэффективности технологического процесса нанесения покрытий и трудность его автоматизации [11]. Первая из этих проблем традиционно решается путем отработки технологии в ходе многочисленных экспериментов с целью подбора оптимального технологического режима нанесения покрытий. Вторая проблема связана с влиянием на свойства покрытий большого количества разнородных факторов, а также с разнообразием технологических режимов получения покрытий, что предполагает создание специализированных баз данных. Более эффективным решением этих проблем могла бы стать разработка цифрового двойника процесса МДО, т.е. сложной имитационной модели, способной в режиме симуляции с высокой точностью воспроизводить весь процесс получения покрытий с учетом заданных параметров обработки и влияющих факторов без необходимости задействовать основное технологическое оборудование. Это позволит значительно сократить количество натурных испытаний, тем самым снизив энергетические и временные затраты на отработку технологии.

Сложность в создании цифрового двойника процесса МДО заключается в недостаточной исследованности механизма формирования покрытий, который включает в себя электрохимические и плазмохимические реакции, процессы зажигания и гашения микроразрядов, образования и схлопывания парогазовых пузырьков и др. [12]. Разработка комплексной математической модели, учитывающей данные явления в едином взаимосвязанном процессе, представляет собой сложную за-

* Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Фундаментальные основы цифрового двойника технологического процесса формирования оксидных покрытий с заданными свойствами методом микродугового оксидирования» (№ 123091800009-1).