

## МДО – СИНТЕЗ НАНОКЕРАМИЧЕСКИХ СЛОЕВ НА ДЕТАЛЯХ ИЗ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

**В** экстремальных условиях эксплуатации требования к конструкционным материалам ужесточаются и становятся все более комплексными, поэтому разработка технологий модифицирования поверхности деталей и изделий – актуальная и перспективная задача. Одна из бурно развивающихся технологий в этой области – микро-дуговое оксидирование (МДО).

МДО – метод формирования многофункциональных керамико-подобных защитных слоев на поверхности и в приповерхностной зоне вентильных металлов и сплавов, основанный на использовании энергии поверхностных электрических разрядов в электролите.

Научно-технологическое развитие МДО началось еще в 70-е годы XX века. Практически одновременно в США [1], Японии [2], Германии [3] и России [4, 5] были созданы лабораторно-промышленные установки и проведено исследование особенностей формирования функциональных слоев. Дальнейшее развитие в России метод получил, в частности, в МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского, где в течение ряда лет ведутся работы по изучению механизма процесса, исследованию МДО-слоев и отработке оптимальных технологических параметров модифицирования поверхности различных сплавов, создаются новые образцы современного высокоэффективного оборудования.

Отличительная особенность метода – контрагирование (локализация посредством шнурования) микродугового разряда в микро- и нанопорах стартового барьерного слоя, благодаря чему происходят кратковременный ( $\sim 10^{-6}$  с) локальный разогрев пробойного промежутка до температуры  $\sim 10^4$  К и последующее высокоскоростное охлаждение его после угасания разряда. Это создает условия для протекания плазмохимических реакций в системе металл–оксид–электролит и закал-

ки получающихся продуктов. В результате происходит синтез наноразмерных оксидокерамических структурных составляющих, представляющих собой основу формируемого в процессе дальнейшей обработки композиционного слоя толщиной до 400 мкм, прочно сцепленного с металлом-основой. Снимки поперечного (а) и продольного (б) шлифов таких образцов представлены на рис.1.

Управление процессом обработки осуществляется варьированием значений технологических факторов: напряжения, плотности тока, продолжительности и формы импульса анодного и катодного полупериодов, длительности бестоковой паузы, частоты следования импульсов, состава и температуры электролита. Следует отметить, что регулирование состава, размеров и количества структурных компонентов модифицированного слоя обеспечивает возможность контролируемого создания и модифицирования объектов, включающих структуры с размерами менее 100 нм и имеющих принципиально новый фазовый состав. Это, в свою очередь, позволяет радикально изменять макромасштабные параметры широкого круга материалов и изделий из них.

Модифицирующий эффект МДО существенно больше по сравнению с известными методами обработки вентильных сплавов (например, анодированием), он позволяет достичь высокого уровня электроизоляционных свойств, коррозионной стойкости, жаро-, тепло- и износостойкости изделий. Конструкционным ма-

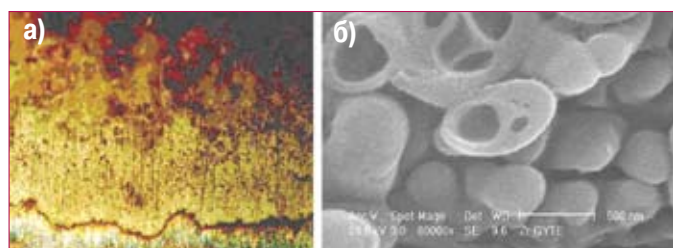


Рис.1 Поверхность образцов, модифицированная МДО-методом: а) сплав Д16, x400, б) сплав Э110, x80000

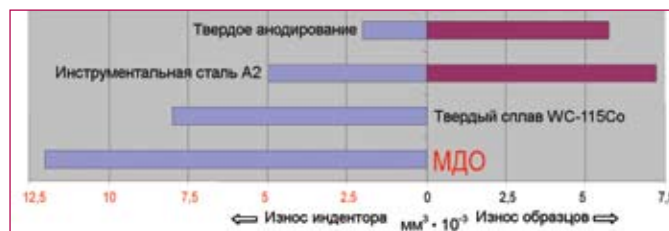
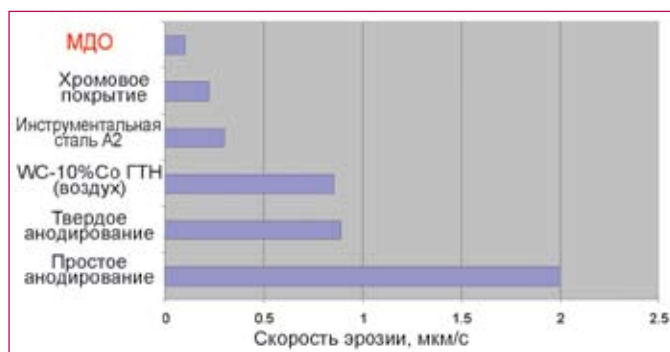


Рис.2 Средняя величина износа индентора и образцов, упрочненных различными методами (Bud Labs, Rochester (NY), методика ASTM G133)



**Рис.3** Кинетика линейной эрозии материалов (Bud Labs, Rochester (NY), методика ASTM G99)

материалам в результате удается придавать комплекс свойств, повышающих эксплуатационные характеристики изделий, что может быть проиллюстрировано, например, данными испытаний

на износостойкость и стойкость к эрозионному воздействию МДО модифицированного сплава 6061 (аналог Д16) (рис.2, 3).

Как видно из представленных диаграмм, наноструктурированные МДО-поверхности близки по трибологическим характеристикам к твердым сплавам на основе карбида вольфрама и превосходят по износостойкости инструментальные стали и твердохромовые покрытия. Немаловажным фактором, обеспечивающим достижение таких параметров, является применение специального оборудования.

Один из ведущих российских и мировых центров в области технологии МДО, обладающий опытом разработки и внедрения технологических источников тока, —

МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. В университете проделан широкий спектр работ от создания нескольких первых поколений установок МДО, в которых были реализованы минимальные требования по управлению технологическими параметрами и имела простейшая аналоговая система мониторинга, до современных автоматизированных установок 5-го поколения мощностью от 1 до 200 кВт с широким спектром варьируемых параметров, электронными системами управления технологическим процессом.

Спектр современных аппаратных средств для МДО включает основное (технологический источник тока, электролитная ванна) и дополнительное (участки подготовки электролита, контроль параметров технологического процесса и пр.) оборудование. Модульный принцип комплектования обеспечивает поставку оборудования лабораторного и промышленного исполнения различной степени сложности: от наиболее простого, реализующего лишь один технологический режим, до сложного, включающего системы импульсно-фазового управления процессом и фронтами импульсов формирующего напряжения, программно-аппаратного управления и мониторинга [6].

На рис.4 в качестве примера показана изготовленная в МАТИ и внедренная на фирме НРВ (Австрия) роботизированная технологическая линия МДО. В настоящее время в процессе разработки на этапе опытно-конструкторских работ и испытаний находятся технологические источники тока 6-го поколения, которые по ряду характеристик (реализуемые электрические параметры, производительность, энергопотребление) превосходят более чем в 2,5 раза оборудование 5-го поколения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Brown S.D., Kuna K.J., Tran Bao Van. Anodic Spark Deposition from Aqueous Solutions of  $\text{NaAlO}_2$  and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . — J. Amer. Ceram. Soc., 1971, v. 54, № 4, p. 384–390.
2. Yamada M., Mita I. Formation of  $\eta$ -alumina by anodic oxidation of aluminium. — Chem. Lett., 1982, № 5, p. 759–762.
3. Dittrich K.-H., Krysmann W., Kurze P., Schneider H.G. Structure and properties of ANOF layers. — Crystal Res. & Technol., 1984, v. 19, № 1, p. 93–99.
4. А.С. 1485670 СССР (C23C 28/00). Способ защиты от сульфидного растрескивания и износа / Ефремов А.П., Марков Г.А., Ропяк Л.Я., Саакян Л.С., Эпельфельд А.В. // Заявлено 24.07.85, зарегистрировано 08.02.89.
5. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). — М.: ЭКОМЕТ, 2005.
6. Apelfeld A.V., Borisov A.M., Krit B.L., Ludin V.B., Souminov I.V. Soft-hardware control and monitoring system of microarc oxidation installations. // Mathematical modeling and computer simulation material technologies / Proceedings of the 5th Int. conf. MMT-2008, p. 4-31–4-37.

**Рис.4** Роботизированный технологический комплекс МДО-100 с системой программного управления