

В.А. ИВАНОВ^{1,2}, А.С. САХАРОВ¹, М.Е. КОНЫЖЕВ¹,
А.А. ДОРОФЕЮК¹, Т.И. КАМОЛОВА¹

¹Институт общей физики им.А.М. Прохорова Российской Академии Наук, Москва

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

МИКРОПЛАЗМЕННЫЕ РАЗРЯДЫ, ВОЗБУЖДАЕМЫЕ НА ПОВЕРХНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ: ЭКСПЕРИМЕНТ, ТЕОРИЯ, ПРИЛОЖЕНИЯ

Взаимодействие импульсного потока плазмы с отрицательно заряженной ($\sim 100\text{--}450\text{ В}$) металлической поверхностью, частично покрытой диэлектрической пленкой толщиной $\sim 1\text{ мкм}$, приводит к возбуждению микроплазменных разрядов (МПР) на краю пленки [1–3] (Рис. 1). Механизм возбуждения МПР следующий. Под действием потока ионов внешняя поверхность пленки приобретает положительный электрический потенциал по отношению к металлу, вследствие чего на краю пленки возникает сильное электрическое поле порядка нескольких МВ/см. Это электрическое поле в результате дополнительного усиления на микроостриях металлической поверхности, инициирует автоэлектронную и взрывную электронную эмиссию из металла (Рис. 2), и, таким образом, приводит к развитию локализованных вблизи края диэлектрической пленки на поверхности металла МПР, в которых образуется плазма с характерными параметрами: плотность $\sim 10^{20}\text{ см}^{-3}$, температура $0.5\text{--}1\text{ эВ}$ [4]. Высокое давление ($\sim 10^7\text{ Па}$) плазмы и паров металла над локальной поверхностью расплавленного металла приводит к деформации поверхности расплава металла в виде вогнутой поверхности микрократера. В результате быстрого перемещения МПР по поверхности металла локальная расплавленная область охлаждается и затвердевает за короткое время менее 1 мкс вследствие отвода тепла вглубь металла. В результате происходит локальная термическая закалка поверхности металла и формируется микрократер. В импульсном МПР длительностью 20 мс возникают десятки кратеров с размерами от $0.1\text{--}10\text{ мкм}$, перемещающихся со скоростью до 100 м/с . Одновременно с плавлением локальной области металла МПР испаряют диэлектрическую пленку, покрывающую поверхность металла (Рис. 3). В результате возбуждения на поверхности образцов из конструкционных металлов (титан, алюминий, сталь) 10 разрядов с импульсным электрическим током $100\text{--}600\text{ А}$ поверхность образцов площадью 2 см^2 оказывается полностью переплавленной и очищенной от диэлектрической пленки (Рис.4).

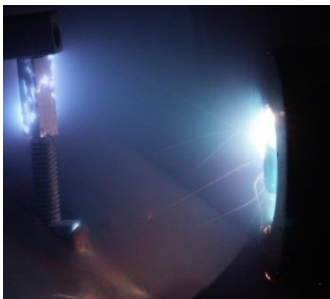


Рис. 1. Выход плазменного инжектора, создающего инициирующий поток плазмы (справа) с концентрацией $n_e = 4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и температурой электронов $T_e = 10 \text{ эВ}$, и микроплазменные разряды, возбуждаемые на поверхности образца из титана (слева).

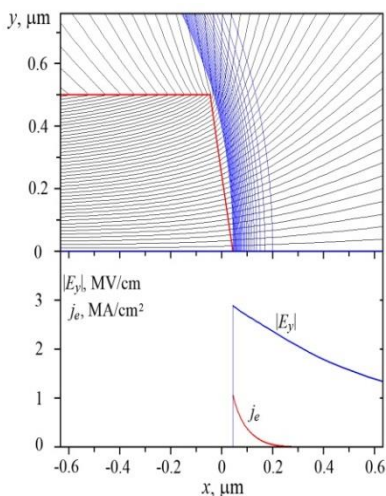


Рис. 2. На верхней части рисунка: распределение электрического потенциала (серые линии эквипотенциалей при разности между соседними $\Delta\phi = 0,5T_e/e$) вблизи края пленки (красный контур) толщиной $d = 0,5 \text{ мкм}$, траектории эмитированных электронов (синие линии). На нижней части рисунка: профили напряженности электрического поля на металле $|E_y|$ и плотности тока автоэлектронной эмиссии j_e в момент времени, соответствующий максимальному току эмиссии ($t = 0.71 \text{ мкс}$), при $\phi_0 = -400 \text{ В}$, (водородная плазма). Угол среза края диэлектрической пленки $\alpha = 80^\circ$, работа выхода электронов из металла $\phi = 3 \text{ эВ}$, дополнительное усиление поля на микроостриях металла $\beta = 15$.

В результате микроплазменной обработки на поверхности металла формируется прочный микрорельеф в виде перекрывающихся микрократеров, при этом характеристики микрорельефа зависят от возбуждаемого тока разрядов (Рис. 4).

Результаты трибологических испытаний образцов конструкционных металлов, обработанных МПР [5], показывают, что допустимое прикладываемое к образцам максимальное давление, при котором не образуются задиры на их поверхности при трении, увеличивается в 5–10 раз (Рис. 5, 6).

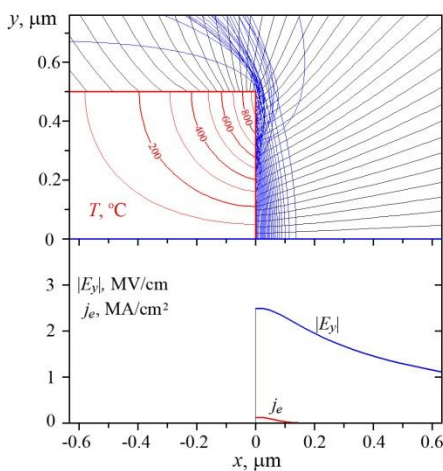


Рис. 3. Распределения электрического потенциала вблизи края пленки и температуры внутри диэлектрика, траектории эмитированных электронов, а также профили напряженности электрического поля на металле $|E_y|$ и плотности тока автоэлектронной эмиссии в момент времени, соответствующий максимальному току эмиссии ($t = 0.71$ мкс), для тех же параметров, что и на рис. 4, но для вертикального среза края пленки ($\alpha = 90^\circ$).

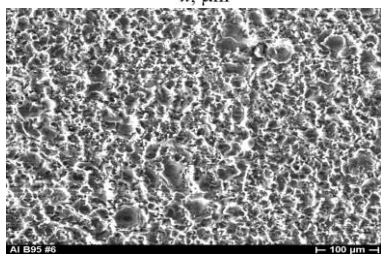


Рис. 4. Микрорельеф, сформированный на поверхности алюминиевого сплава B95 после воздействия 10 импульсных МПР: ток 200 А, длительность импульсов 20 мс.

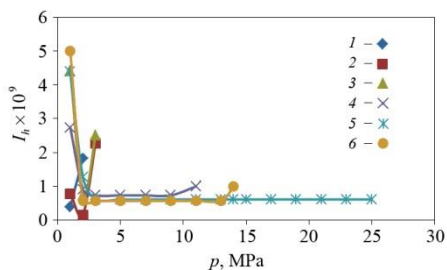


Рис. 5. Зависимости I_h — интенсивности относительного износа при трении образцов из стали-45: 1 — в исходном состоянии, 2 — после отжига, 3–6 — после отжига и микроплазменного упрочнения соответственно при значениях тока $i = 100, 200, 400$ и 650 А.

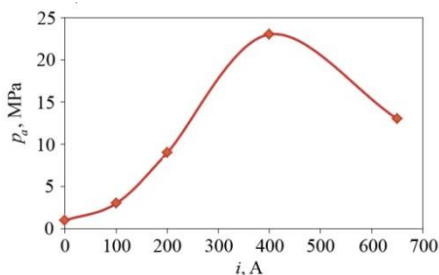


Рис. 6. Допустимое давление p_a для образцов из стали 45 в зависимости от величины тока i импульсных МПР. Крайняя точка слева (в окрестности значения «0») соответствует образцу из стали 45, который не подвергался обработке МПР.

Эксперименты по биологической совместимости стволовых клеток костной ткани с поверхностью титана, обработанного МПР, показали их хорошее сродство к микрорельефу, создаваемому на поверхности титана [6]. Применение МПР, возбуждаемых на металлах, открывает широкие перспективы для создания износостойких поверхностей на готовых изделиях из конструкционных металлов, которые могут найти применение в различных отраслях промышленности и в медицине.

Список литературы

- [1] Иванов В. А., Сахаров А. С., Коныжев М. Е. // Физика плазмы. 2008. Т. 34. С. 171.
- [2] Иванов В. А., Сахаров А. С., Коныжев М. Е. // Успехи прикл. физики. 2013. Т. 1. С. 697.
- [3] Сахаров А. С., Иванов В. А. // Успехи прикл. физики. 2016. Т. 4. С. 150.
- [4] Ivanov V. A., Jüttner B., Pursch H. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. V. 13. P. 334.
- [5] Иванов В. А., Коныжев М. Е., Куксенова Л. И., Лаптева В. Г., Хренникова И. А. // Пробл. машиностроения и надежности машин. 2015. № 4. С. 96.
- [6] Димитрович Д. А., Бычков А. И., Иванов В. А. // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 35.