

**Время жизни катодных пятен на поверхности титана  
при возбуждении микроплазменного разряда***В. А. Иванов, М. Е. Коньжев, Т. И. Камолова, А. А. Дорофеюк*

*Экспериментально исследована структура свечения микроплазменного разряда, инициируемого в вакууме импульсным потоком внешней плазмы на поверхности титанового образца, покрытого естественной сплошной оксидной пленкой толщиной 2–6 нм. При воздействии плазмы с плотностью около  $10^{13}$  см<sup>-3</sup> и электронной температурой 10 эВ на поверхность образца, с отрицательным потенциалом –400 В относительно потенциала плазмы, внешняя поверхность оксидной пленки приобретает положительный электрический заряд в результате потока ионов из плазмы. При этом внутри диэлектрической пленки возникает сильное электрическое поле около 4 МВ/см. Электрический пробой между заряженной поверхностью пленки и металлом инициирует возбуждение микроплазменного разряда на поверхности титана. Интегральное свечение микроплазменного разряда в макромасштабе представляет собой разветвленную структуру типа дендрита, которая в микромасштабе состоит из большого количества ярко светящихся «точечных» образований – локализованных на поверхности металла катодных пятен и свечения ореола вокруг них. С помощью высокоскоростного фоторегистратора IMACON-468 исследован фрагмент поверхности титана площадью 0,5×0,4 мм<sup>2</sup> в области свечения катодных пятен. На основе анализа оптического свечения катодных пятен на 7 последовательных кадрах фоторегистратора с экспозицией каждого кадра 100 нс и интервалом между кадрами 400 нс рассчитано ожидаемое «время жизни» катодных пятен в интервале значений 0,5±0,2 мкс. По пространственному распределению свечения микроплазменных разрядов определено, что средний диаметр катодных пятен составляет величину около 16±4 мкм, при этом средний размер светящегося ореола вокруг отдельного катодного пятна достигает значения 100 мкм.*

*Ключевые слова:* микроплазменный разряд, вакуум, поверхность, титан, диэлектрическая пленка, свечение, катодное пятно, время жизни, характерный размер, микрократер.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-425-439

**Иванов Вячеслав Алексеевич**, гл.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

**Коньжев Михаил Евгеньевич**, н.с.**Дорофеюк Анна Александровна**, н.с., к.т.н.**Камолова Татьяна Ивановна**, н.с., к.т.н.Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН,  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38.*Статья поступила в редакцию 30 сентября 2022 г.*© Иванов В. А., Коньжев М. Е., Дорофеюк А. А.,  
Камолова Т. И., 2022

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коньжев М. Е. Иницирование микроплазменных разрядов на краю диэлектрической пленки, нанесенной на поверхность металла // Физика плазмы. 2008. Т. 34. № 2. С. 171.
2. Ivanov V. A., Sakharov A. S., Konyzhev M. E. "Plasma initiation of vacuum arcs on a metal surface partially covered with a dielectric film," 2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Bucharest. 2008. Vol. 2. P. 575–578.  
<https://doi.org/10.1109/DEIV.2008.4676859>
3. Иванов В. А., Коньжев М. Е., Куксенова Л. И., Лантева В. Г., Сахаров А. С., Дорофеюк А. А., Камолова Т. И., Сатунин С. Н., Летунов А. А. Воздействие

- микроплазменных разрядов на поверхность алюминия // Прикладная физика. 2010. № 6. С. 57.  
<https://applphys.orion-ir.ru/appl-10/10-6/PF-10-6-57.pdf>
4. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Куksenova Л. И., Лантева В. Г., Сахаров А. С., Камолова Т. И., Дорофеюк А. А., Сатунин С. Н. Сильное локализованное взаимодействие микроплазменных разрядов с титаном // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 76.  
<https://applphys.orion-ir.ru/appl-09/09-6/PF-09-6-76.pdf>
5. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Куksenova Л. И., Лантева В. Г., Хренникова И. А. Влияние микроплазменной обработки на структуру, микрогеометрию поверхности и триботехнические характеристики конструкционных сплавов // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 4. С. 396.
6. Иванов В. А., Сахаров А. С., Коныжев М. Е. Формирование сильного электрического поля, приводящего к возбуждению микроплазменных разрядов на краю диэлектрической пленки на металле в потоке плазмы // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 697.  
<https://advance.orion-ir.ru/UPF-13/6/UPF-1-6-697.pdf>
7. Stamate M. D. On the dielectric properties of dc magnetron TiO<sub>2</sub> thin films // Applied Surface Science. 2003. Vol. 218. Issues 1–4. P. 317.  
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00624-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00624-X)
8. Oja Acik I., Mere A., Krunk M., Nisumaa R., Solterbeck C.-H., Ec-Souni M. Structural and electrical characterization of TiO<sub>2</sub> films grown by spray pyrolysis // Thin Solid Films. 2006. Vol. 515. Issue 2. P. 674.  
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.243>
9. Ivanov V. A., Sakharov A. S., Konyzhev M. E., Kamolova T. I., Dorofeyuk A. A., Kuksenova L. I. Microplasma discharges exited by a plasma flow on constructional metals // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 907(1). P. 012023.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/907/1/012023>
10. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Khrennikova I. A. Strengthening surface layers of samples made of steel 45 using microplasma treatment // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2015. Vol. 44. № 4. P. 384.  
<https://doi.org/10.3103/S1052618815040032>
11. Ivanov V. A., Konyzhev M. E., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Alekseeva M. S., Khrennikova I. A., Letunov A. A., Sakharov A. S., Kamolova T. I., Dorofeyuk A. A., Satunin S. N. Creation of a Hard Microrelief on a Titanium Surface Processed by Microplasma Discharges with a Current Amplitude of 200 A and Pulse Duration of 20 ms // Plasma Physics Reports. 2012. Vol. 38. № 13. P. 1105.  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X12080144>
12. Ivanov V. A., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Konyzhev M. E. Application of the microplasma method for strengthening of the near-surface layer of samples made from steel 45 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2008. Vol. 37. № 3. P. 278.  
<https://doi.org/10.3103/S1052618808030126>
13. Димитрович Д. А., Бычков А. И., Иванов В. А. Влияние физических методов обработки поверхности титана на рост колоний клеток костной биологической ткани // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 35.
14. Ivanov V. A., Kuksenova L. I., Lapteva V. G., Konyzhev M. E. The effect of microplasma treatment on the properties of a near-surface layer in specimens of a Ni-Cr alloy // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2007. Vol. 36. № 6. P. 569.  
<https://doi.org/10.3103/S1052618807060118>
15. Textor Marcus, Sittig Caroline, Frauchiger Vincent, Tosatti Samuele, Brunette Donald M. Properties and Biological Significance of Natural Oxide Films on Titanium and Its Alloys: In book: Titanium in Medicine (pp. 171–230) Springer, January 2001.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-56486-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56486-4_7)
16. Sittig C., Textor M., Spencer N. D., Wieland M., Vallotton P. H. Surface characterization of implant materials CP Ti, Ti–6Al–7Nb and Ti–6Al–4V with different pretreatments // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. 1999. Vol. 10. P. 35.  
<https://doi.org/10.1023/a:1008840026907>
17. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Камолова Т. И., Дорофеюк А. А. Распространение микроплазменного разряда по поверхности титана, покрытого тонкой диэлектрической пленкой // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 239.  
<https://advance.orion-ir.ru/UPF-20/4/UPF-8-4-239.pdf>
18. Vacuum Arcs: Theory and Application, Ed. by J. M. Lafferty. – New York: Wiley, 1980.
19. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots To Energetic Condensation (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics). Vol. 50. – New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2008.
20. Иванов В. А. Трехэлектродный несимметричный зонд для непрерывного измерения температуры и плотности плазмы // Краткие сообщения по физике ФИАН. 1988. № 6. С. 33.
21. Ivanov V. A. Triple Probe Method for Characterization of Arc Cathode Plasmas // Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Elektronenphysik. Preprint 85–1. Pp. 1–9.
22. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. Time Resolved Measurements of Arc Cathode Plasma in Vacuum / Proceedings XI th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 1984. Berlin, DDR. Vol. 1. P. 157–160.
23. Ivanov V. A., Juttner B., Pursch H. "Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum" // IEEE Transactions on Plasma Science. 1985. Vol. 13. № 5. P. 334.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316432>
24. Иванов В. А., Коныжев М. Е., Камолова Т. И., Дорофеюк А. А. Характер распространения микроплазменных разрядов по поверхности титана, покрытого тонкой оксидной пленкой // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 6. С. 449.  
<https://doi.org/10.51368/2307-4469-2021-9-6-449-463>
25. Иевлев В. М., Кущев С. Б., Латышев А. Н., Овчинников О. В., Леонова Л. Ю., Смирнов М. С., Синельников А. А., Возгорьков А. М., Ивкова М. А. Люминесценция тонких пленок диоксида титана // Конденсированные среды и межфазные границы. 2012. Т. 14. № 2. С. 141.
26. Сериков Т. М., Ибраев Н. Х., Исайкина О. Я.,

Савилов С. В. Нанокристаллические пленки TiO<sub>2</sub>: синтез, низкотемпературные люминесцентные и фотовольтаические свойства // Журнал неорганической химии. 2021. Т. 66. № 1. С. 107.

27. Botov M. A., Kuznetsov A. Yu., Sobolev A. B. Near-surface centers of luminescence in titanium dioxide // AIP Conference Proceedings. 2022. Vol. 2466. P. 030008. <https://aip.scitation.org/doi/epdf/10.1063/5.0088939>

PACS: 52.40.Hf

## Lifetime of cathode spots on the titanium surface when exciting a microplasma discharge

V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov st., Moscow, 119991, Russia  
E-mail: ivanov@fpl.gpi.ru

Received September 30, 2022

*The structure of the glow of a microplasma discharge initiated in vacuum by a pulsed flow of external plasma on the surface of a titanium sample coated with a natural 2–6-nm-thick oxide film has been experimentally investigated. When a plasma with a density of about  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  and an electron temperature of 10 eV interacts with a sample under a negative potential of –400 V relative to the plasma potential, the outer surface of the oxide film acquires a positive electric charge as a result of the flow from the plasma. In this case, a strong electric field of about 4 MV/cm arises inside the dielectric film. An electrical breakdown between the charged surface of the film and the metal initiates the excitation of a microplasma discharge on the surface of titanium. The integral glow of a microplasma discharge at the macroscale is a branched structure of the dendrite type, which at the microscale consists of a large number of brightly glowing "point" formations – cathode cells localized on the metal surface. Using the IMACON-468 high-speed photo recorder, a fragment of the titanium surface with an area of  $0.5 \times 0.4 \text{ mm}^2$  in the area of the cathode spots glow was studied. Based on the analysis of the optical glow of cathode spots on 7 consecutive frames of the high-speed photo recorder with an exposure of each frame of 100 ns and an interval between frames of 400 ns, the expected "lifetime" of cathode spots in the range of values of  $0.5 \pm 0.2$  microseconds is calculated. According to the spatial distribution of the glow of micro-discharges, it was determined that the average diameter of the cathode spots is about  $16 \pm 4$  microns, while the average size of the luminous halo around a single cathode spot reaches a value of 100 microns.*

*Keywords:* microplasma discharge, interaction, titanium surface, oxide dielectric film, optical glow, propagation, cathode spot, microcrater, erosion.

DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-5-425-439

1. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, "Initiation of microplasma discharges at the edge of a dielectric film deposited on a metal surface," *Plasma Physics Reports* **34** (2), 150 (2008).  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X08020074>
2. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, "Plasma initiation of vacuum arcs on a metal surface partially covered with a dielectric film," 2008 23rd International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Bucharest **2**, 575 (2008).  
<https://doi.org/10.1109/DEIV.2008.4676859>
3. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, A. S. Sakharov, A. A. Dorofeyuk, T. I. Kamolova, S. N. Satunin, and A. A. Letunov, "Effect of Microplasma Discharges on Aluminum Surfaces," *Plasma Physics Reports* **37** (13), 1230 (2011).  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X11060109>
4. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, A. S. Sakharov, T. I. Kamolova, A. A. Dorofeyuk, and S. N. Satunin, "Strong Localized Interaction of Microplasma Discharges with Titanium", *Plasma Physics Reports* **36** (13), 1241 (2010).  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X10130258>
5. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and I. A. Khrennikova, "Influence of microplasma machining on the surface structure and microgeometry and tribological behavior of structural alloys", *Journal of Friction and Wear* **30** (4), 290 (2009).  
<https://doi.org/10.3103/S1068366609040114>
6. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, and M. E. Konyzhev, "Formation of a strong electric field resulting in the excitation of microplasma discharges at the edge of a dielectric film on a metal in a plasma flow", *Plasma Physics Reports* **42** (6), 619 (2016).  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X16060039>
7. M. D. Stamate, "On the dielectric properties of dc magnetron TiO<sub>2</sub> thin films", *Applied Surface Science* **218** (1–4), 317 (2003).  
[https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00624-X](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00624-X)
8. I. Oja Acik, A. Mere, M. Krunks, R. Nisumaa, C.-H. Solterbeck, and M. Ec-Souni, "Structural and electrical characterization of TiO<sub>2</sub> films grown by spray pyrolysis", *Thin Solid Films* **515** (2), 674 (2006).  
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.12.243>
9. V. A. Ivanov, A. S. Sakharov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, A. A. Dorofeyuk, and L. I. Kuksenova, "Microplasma discharges excited by a plasma flow on constructional metals", *Journal of Physics: Conference Series* **907** (1), 012023 (2017).  
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/907/1/012023/pdf>
10. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and I. A. Khrennikova, "Strengthening surface layers of samples made of steel 45 using microplasma treatment", *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **44** (4), 384 (2015).  
<https://doi.org/10.3103/S1052618815040032>
11. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, M. S. Alekseeva, I. A. Khrennikova, A. A. Letunov, A. S. Sakharov, T. I. Kamolova, A. A. Dorofeyuk, and S. N. Satunin, "Creation of a Hard Microrelief on a Titanium Surface Processed by Microplasma Discharges with a Current Amplitude of 200 A and Pulse Duration of 20 ms", *Plasma Physics Reports* **38** (13), 1105 (2012).  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X12080144>
12. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and M. E. Konyzhev, "Application of the microplasma method for strengthening of the near-surface layer of samples made from steel 45", *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **37** (3), 278 (2008).  
<https://doi.org/10.3103/S1052618808030126>
13. D. A. Dimitrovich, A. I. Bychkov, and V. A. Ivanov, "Influence of physical methods of titanium surface treatment on the growth of colonies of cells of bone biological tissue", *Applied Physics*, No. 2, 35 (2009) [in Russian].
14. V. A. Ivanov, L. I. Kuksenova, V. G. Lapteva, and M. E. Konyzhev, "The effect of microplasma treatment on the properties of a near-surface layer in specimens of a Ni-Cr alloy", *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* **36** (6), 569 (2007).  
<https://doi.org/10.3103/S1052618807060118>
15. Marcus Textor, Caroline Sittig, Vincent Frauchiger, Samuele Tosatti, and Donald M. Brunette, Properties and Biological Significance of Natural Oxide Films on Titanium and Its Alloys: In book: *Titanium in Medicine* (pp. 171–230) Springer, January 2001.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-642-56486-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-56486-4_7)
16. C. Sittig, M. Textor, N. D. Spencer, M. Wieland, and P. H. Vallotton, "Surface characterization of implant materials CP Ti, Ti–6Al–7Nb and Ti–6Al–4V with different pretreatments", *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* **10**, 35 (1999).  
<https://doi.org/10.1023/a:1008840026907>
17. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk, "Propagation of Microplasma Discharge over Titanium Surface Covered with Thin Dielectric Film", *Plasma Physics Reports* **47** (6), 603 (2021).  
<https://doi.org/10.1134/S1063780X21060076>
18. Vacuum Arcs: Theory and Application, Ed. by J. M. Lafferty. (Wiley, New York, 1980).
19. A. Anders, Cathodic Arcs: From Fractal Spots To Energetic Condensation (Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics). Vol. 50. New York, NY, USA: Springer-Verlag, 2008.
20. V. A. Ivanov, "Three-electrode asymmetric probe for continuous measurement of plasma temperature and density", *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, No. 6, 33 (1988).
21. V. A. Ivanov, "Triple Probe Method for Characterization of Arc Cathode Plasmas", *Akademie der Wissenschaften der DDR, Zentralinstitut für Elektronenphysik*. Preprint 85–1. Pp. 1–9.
22. V. A. Ivanov, B. Juttner, and H. Pursch, "Time Resolved Measurements of Arc Cathode Plasma in Vacuum", *Proceedings XI th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*. 1984. Berlin, DDR. Vol. 1. P. 157–160.
23. V. A. Ivanov, B. Juttner, and H. Pursch, "Time-Resolved Measurements of the Parameters of Arc Cathode Plasmas in Vacuum," *IEEE Transactions on Plasma Science* **13** (5), 334 (1985).  
<https://doi.org/10.1109/TPS.1985.4316432>
24. V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova,

and A. A. Dorofeyuk, “The characteristics of propagation of microplasma discharges over the surface of titanium coated with a thin oxide film”, *Usp. Prikl. Fiz.* **9** (6), 449 (2021) [in Russian]; [V. A. Ivanov, M. E. Konyzhev, T. I. Kamolova, and A. A. Dorofeyuk, “The characteristics of microplasma discharge propagation over the titanium surface covered with a thin oxide film”, *Plasma Physics Reports*, to be published (2022).]

25. V. M. Ievlev, S. B. Kushchev, A. N. Latyshev, O. V. Ovchinnikov, L. Yu. Leonova, M. S. Smirnov, A. A. Sinelnikov, A. M. Vozgorkov, and M. A. Ivkova,

“Luminescence of thin films of titanium dioxide”, *Condensed media and interphase boundaries* **14** (2), 141 (2012) [in Russian].

26. T. M. Serikov, N. H. Ibraev, O. Ya. Isaikina, and S. V. Savilov, “Nanocrystalline TiO<sub>2</sub> films: synthesis, low-temperature luminescent and photovoltaic properties”, *Journal of inorganic chemistry* **66** (1), 107 (2021) [in Russian].

27. M. A. Botov, A. Yu. Kuznetsov, and A. B. Sobolev, “Near-surface centers of luminescence in titanium dioxide”, *AIP Conference Proceedings* **2466**, 030008 (2022). <https://aip.scitation.org/doi/epdf/10.1063/5.0088939>