

DOI: [10.34220/2311-8873-2023-23-29](https://doi.org/10.34220/2311-8873-2023-23-29)



УДК 621.9.047

UDC 621.9.047

2.5.6 – технология машиностроения

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

INFLUENCE OF ELECTROCHEMICAL PROCESSING MODES ON MICROHARDNESS OF TITANIUM ALLOYS SURFACE LAYERS

Болдырев Александр Иванович,

д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Ivanovich,

Dr. of Tech. Sc., Professor of Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

Болдырев Александр Александрович,

канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Boldyrev Alexander Aleksandrovich,

Cand. of Tech. Sc., Associate Professor of Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

✉¹ **Перова Алла Владимировна,**

канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, e-mail: pva7@mail.ru

✉¹ **Perova Alla Vladimirovna,**

Cand. of Tech. Sc., Associate Professor of Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh, e-mail: pva7@mail.ru

Григораш Владимир Васильевич,

канд. техн. наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Grigorash Vladimir Vasilyevich,

Cand. of Tech. Sc., Associate Professor of Chair of Metal and Wooden Structures of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

Падурец Анна Александровна,

магистрант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж.

Padurets Anna Alexandrovna,

Master's student of the Mechanical Engineering Technology Chair of the Voronezh State Technical University, Voronezh.

Аннотация. Статья посвящена исследованию влияния режимных параметров электрохимической размерной обработки на микротвердость титановых сплавов, связь её с газонасыщением поверхностного слоя и изменение по глубине.

Annotation. The article is devoted to the study of the influence of regime parameters at electrochemical dimensional processing on the microhardness of titanium alloys, its connection with the gas saturation of the surface layer and the change in depth.

Ключевые слова: МИКРОТВЁРДОСТЬ, ТИТАНОВЫЙ СПЛАВ, ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА, ГАЗОНАСЫЩЕНИЕ, ПОВЕРХНОСТНЫЙ СЛОЙ.

Keywords: MICRONHARDNESS, TITANIUM ALLOY, ELECTROCHEMICAL TREATMENT, GAS SATURATION, SURFACE LAYER.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

При производстве изделий авиационной и ракетно-космической техники широкое применение находит электрохимическая размерная обработка деталей, особенно изготовленных из труднообрабатываемых материалов и в частности из титановых сплавов. Из работ [1-3] известно, что проникновение кислорода в поверхностный слой деталей из титановых сплавов, как правило, сопровождается возникновением упрочнения (увеличением его микротвердости по сравнению с исходным состоянием сплава). В связи с этим создаются предпосылки для предположения, что окислирование поверхностного слоя, сопутствующее электрохимической размерной обработке титановых сплавов [4-6], и приводит к повышению его микротвердости. Упрочнение же поверхностных слоев на финишных операциях технологического процесса изготовления титановых деталей ведет к повышению их эксплуатационных характеристик [7].

Задачами исследования являлось установление влияния режимных параметров электрохимической размерной обработки на микротвердость, связь ее с газонасыщением поверхностного слоя и изменение по глубине.

2 Материалы и методы

Исследование микротвердости поверхности после электрохимической обработки проводилось по следующей методике.

Цилиндрические образцы из титановых сплавов ВТ 9, ВТ 20 и ОТ 4-2 по ГОСТ 19807-91 диаметром 25-40 мм и высотой 15 мм обрабатывались в специальной электрохимической ячейке на станке мод. СЭХО-901. Согласно рекомендациям [8, 9] цилиндрический электрод-инструмент выполнялся из латуни ЛС 59-1 с высотой микронеровностей рабочей поверхности $R_a = 0,63$ мкм. В качестве источника тока использовался трехфазный однополупериодный выпрямитель ВАКГ-6/12 с системой, позволяющей поддерживать постоянными напряжение и плотность тока. Межелектродный зазор для электрохимической обработки устанавливался посредством индикатора с ценой деления 0,01 мм.

Процентное содержание газов (водорода и кислорода) в поверхностном слое определялось спектральным методом [10] на спектрографе ИСП 67. Расшифровка полученного спектра проводилась на микроскопе МИР-12 с использованием спектральных таблиц. Величина газонасыщения определялась фотометрированием по интенсивности почернения пленки на микрофотометре МФ 4 с шириной щели 0,2-0,3 мм при использовании 4 эталонов для построения градуированного графика.

Для определения кислорода использовалась вакуум-камера с вакуум-насосом ВН 461М, которая позволяла проводить исследования при давлении 1,33 Па. Перед проведением экспериментов вакуум-камера продувалась аргоном.

Для определения газонасыщения и микротвердости по глубине на обрабатываемых образцах выполнялись двусторонние косые срезы. Для анализов и измерений на поверхности в центральной части образцов оставлялась полоса шириной 10 мм. Подготовка косых срезов осуществлялась в специальном приспособлении напильниками с бархатной насечкой, снимающими очень небольшой слой металла толщиной 0,025-0,05 мм и дающими высокую точность обработки в пределах 0,01-0,005 мм. Режим обработки образцов обеспечивал сохранение низкой температуры в зоне резания, не приводящей к изменениям в поверхностном слое.

Микротвердость определялась с помощью микротвердомера ПМТ-3М1 согласно инструкциям ГОСТа 9450-76 и рекомендациям [11].

Исходное состояние образцов:

- содержание водорода H, % – 0,005;
- содержание кислорода O, % – 0,08;
- микротвердость поверхностного слоя H_M , Н/мм² – 2900.

Анодное растворение осуществлялось в водных растворах электролитов двух составов (состав I – при соотношении компонентов NaCl:NH₄NO₃ = 3:2, состав II – при соотношении компонентов NaCl:KBr = 1:1) при 5 %, 10 %, 15 %, 20 % и 25 % концентрации (К).

Оптимальные режимы электрохимической размерной обработки выбирались в соответствии с рекомендациями работ [8, 9, 12-14].

3 Результаты исследований

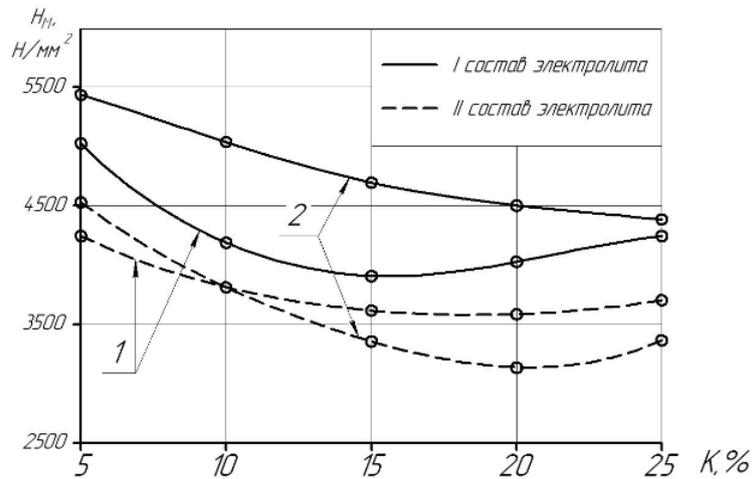
Для определения влияния состава и концентрации электролита при анодном растворении титановых сплавов на микротвердость поверхностей был выполнен комплекс экспериментальных исследований. Зависимости микротвердости поверхности H_M от концентрации электролита на двух исследуемых составах представлены на рис. 1.

Из графиков видно, что при повышении концентрации электролита наблюдается тенденция к снижению микротвердости поверхности, что вполне согласуется с данными по газонасыщению. Микротвердость обработанной поверхности при обработке в электролите состава I явно выше, чем в электролите состава II. Полученные результаты подтверждают, что при применении электролита состава I происходит большее проникновение кислорода в поверхностный слой.

Совместные исследования влияния плотности тока на микротвердость и газонасыщение позволили установить связь характеристик поверхностного слоя (рис. 2). Анализ графических зависимостей показывает, что с возрастанием плотности тока уменьшается микротвердость, наводораживание и оксидирование. Кривые микротвердости и оксидирования практически эквидистантны, а кривая наводораживания проходит значительно круче.

Характер изменения рассматриваемых показателей, а также работы [12] позволяют предположить, что при электрохимическом методе обработки основное влияние на микротвердость поверхностного слоя титановых сплавов оказывает содержание кислорода. Для определения степени влияния сняты зависимости микротвердости от оксидирования поверхности (рис. 3). Содержание кислорода в этих экспериментах изменялось за счет температуры электролита.

Анализ результатов исследований показал, что для всех исследуемых сплавов зависимости имеют линейный участок $b - c$, где микротвердость поверхности пропорциональна содержанию кислорода и зависит от количества кислородных соединений в структуре сплава. Участки кривых $c - d$ соответствуют повышенному содержанию кислорода в поверхности. Они получены при высоких ($\approx 70^\circ \text{C}$) температурах электролита. На этих участках повышение микротвердости уже прекращается и начинается ее снижение.



1 – сплав ВТ 9; 2 – сплав ОТ 4-2

Рисунок 1 – Зависимость микротвердости поверхности от концентрации электролита:

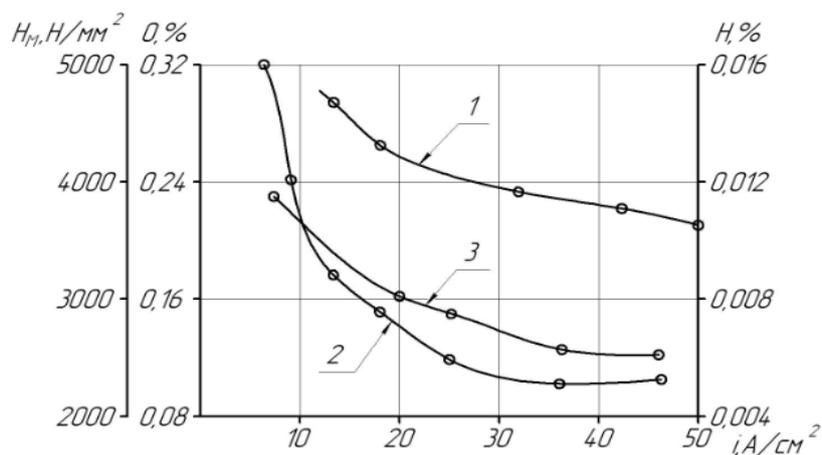
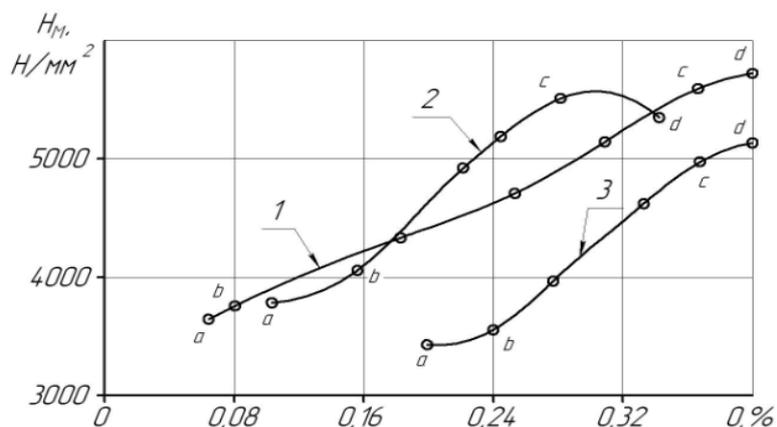


Рисунок 2 – Зависимости микротвердости (1), наводораживания (2) и оксидирования (3) от плотности тока



1 – сплав ВТ 9; 2 – сплав ВТ 20; 3 – сплав ОТ 4-2

Рисунок 3 – Зависимость микротвердости от содержания кислорода в поверхностном слое

Участки *a – b* графических зависимостей получены при низких значениях температур электролита. Здесь также нарушается пропорциональная зависимость микротвердости от степени окислирования поверхности. Эти закономерности, на наш взгляд, вполне объяснимы: при значительном отклонении температуры электролита от оптимальных значений изменяются процессы, происходящие на аноде, поверхность покрывается серой окисной пленкой, которая определяет значение микротвердости.

Диапазон изменения микротвердости поверхностного слоя для всех трех сплавов и исследуемых составов электролитов (изменение концентрации – 5-25 %) представлен в табл. 1.

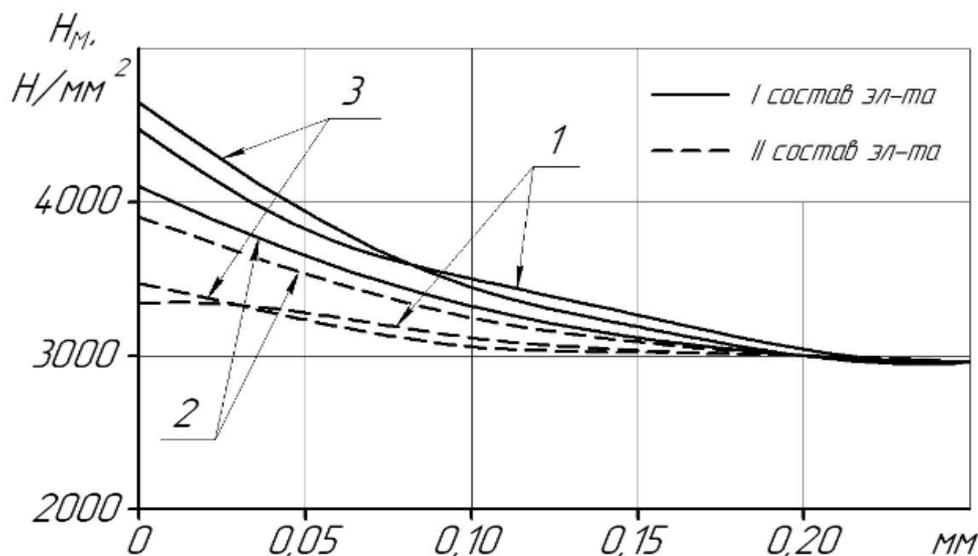
Таблица 1 – Микротвердость поверхности, Н/мм²

Электролит	Титановый сплав		
	ВТ 9	ВТ 20	ОТ 4-2
Состав I	3500-5500	3500-5300	3500-5000
Состав II	3000-4500	3500-5000	3000-4500

Для полной характеристики свойств обработанной поверхности выполнены исследования микротвердости поверхностного слоя по глубине после электрохимической размерной обработки на оптимальных режимах в электролитах различных составов, концентраций и температур. На рис. 4 графически представлены полученные зависимости.

Таблица 2 – Глубина слоя с измененной микротвердостью, мм

Электролит	Титановый сплав		
	ВТ 9	ВТ 20	ОТ 4-2
Состав I	0,20-0,25	0,15-0,20	0,20-0,25
Состав II	0,10-0,15	0,15-0,20	0,15-0,20



1 – сплав ВТ 9; 2 – сплав ВТ 20; 3 – сплав ОТ 4-2

Рисунок 4 – Изменение микротвердости по глубине проникновения

4 Обсуждение и заключение

1. Изменение микротвердости определяется содержанием кислорода в поверхности и колеблется при изменении режимов анодного растворения в пределах 3000-5500 Н/мм².
2. Изменение микротвердости поверхностного слоя зависит от обрабатываемого титанового сплава и применяемого электролита.
3. Оксидирование поверхностного слоя титановых сплавов при электрохимической размерной обработке приводит к появлению слоя с измененной микротвердостью глубиной до 0,2-0,25 мм. При оптимальных режимах обработки микротвердость поверхностного слоя по сравнению с исходным состоянием сплава увеличивается в 1,2-1,6 раза.

Список литературы

- 1 Sieniawski J. Titanium Alloys Advances in Properties Control / J. Sieniawski, W. Ziaja. Intech. 2013. 155 p.
- 2 Производство и применение редких и редкоземельных металлов / Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 24-2020. М.: Бюро НДТ, 2020. С. 99-108.
- 3 Froes F. Titanium for Consumer Application: Real-World Use of Titanium / F. Froes, M. Qian, M. Niinomi. Elsevier, 2019. 356 p.
- 4 Qu Ningsong. Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloys / Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Shu // Chinese Journal of Aeronautics. 2013. Volume 26. Issue 1. P. 224-229.
- 5 Давыдов А.Д. Электрохимическая размерная обработка титана / А.Д. Давыдов, Т.Б. Кабанова, В.М. Волгин // Электрохимия, 2017, № 9, с. 1056-1082.
- 6 Смоленцев Е.В. Электрохимическая обработка титановых сплавов проволокой с осевой подачей электролита // Е.В. Смоленцев, В.Г. Грицюк, О.Г. Шипилова, Д.Е. Крохин // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. № 6. С. 146-151.
- 7 Безъязычный В.Ф. Обеспечение показателей качества поверхностного слоя деталей ГТД на эксплуатационные свойства / В.Ф. Безъязычный. Рыбинск: ОАО «НПО «Сатурн»», 2004. 314 с.
- 8 Справочник технолога-машиностроителя. Т. 2 / В.Н. Андреев, А.Н. Афонин, В.Ф. Безъязычный и др.: под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина. М.: Инновационное машиностроение. 2018. 818 с.
- 9 Справочник технолога / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Б.М. Базров и др.: под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Инновационное машиностроение. 2019. 800 с.
- 10 Борисова О.М. Химические, физико-химические и физические методы анализа / О.М. Борисова, В.Д. Сальников. М.: Металлургия, 1991. 268 с.
- 11 Теплоухов А.А., Измерение микротвердости поверхностных слоев материалов / А.А. Теплоухов. Омск: Изд-во ОмГТУ. 2017. 35 с.
- 12 El-Taweel T.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process – RSM approach / T.A. El-Taweel, S.A. Glouda // Int. J/ Adv. Manuf. Technol. 2011. P. 181-190.
- 13 Dikova T. Surface morphologie of pure titanium after anodization / T. Dikova // Machines, technologies, materials. 2014. №12. P. 3–7.
- 14 Park H. Characterization of highly ordered TiO₂ nanotube arrays obtained by anodic oxidation / H. Park, H.-G. Kim, W.-Y. Choi // Transactions on electrical and electronical materials. 2010. Volume 11. № 3. P. 112-115.

References

- 1 Sieniawski J. Titanium Alloys Advances in Properties Control / J. Sieniawski, W. Ziaja. Intech. 2013. 155 p.
- 2 Proizvodstvo i primenenie redkix i redkozemel'ny'x metallov / Informacionno-texnicheskij spravochnik po nailuchshim dostupny'm texnologiyam ITS 24-2020. M.: Byuro NDT, 2020. S. 99-108.
- 3 Froes F. Titanium for Consumer Application: Real-World Use of Titanium / F. Froes, M. Qian, M. Niinomi. Elsevier, 2019. 356 p.
- 4 Qu Ningsong. Wire electrochemical machining with axial electrolyte flushing for titanium alloys / Ningsong Qu, Xiaolong Fang, Wei Li, Yongbin Zeng, Di Shu // Chinese Journal of Aeronautics. 2013. Volume 26. Issue 1. P. 224-229.
- 5 Davy`dov A.D. E`lektroximicheskaya razmernaya obrabotka titana / A.D. Davy`dov, T.B. Kabanova, V.M. Volgin // E`lektroximiya, 2017, № 9, s. 1056-1082.
- 6 Smolencev E.V. E`lektroximicheskaya obrabotka titanovy'x splavov provolokoj s osevoj podachej e`lektrolita // E.V. Smolencev, V.G. Griczyuk, O.G. Shipilova, D.E. Kroxin // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo texnicheskogo universiteta. 2018. № 6. S. 146-151.
- 7 Bez`yazy`chny`j V.F. Obespechenie pokazatelej kachestva poverxnostnogo sloya detalej GTD na e`kspluatacionny'e svojstva / V.F. Bez`yazy`chny`j. Ry`binsk: OAO «NPO «Saturn»», 2004. 314 s.
- 8 Spravochnik texnologa-mashinostroitelya. T. 2 / V.N. Andreev, A.N. Afonin, V.F. Bez`yazy`chny`j i dr.: pod red. A.S. Vasil`eva, A.A. Kutina. M.: Innovacionnoe mashinostroenie. 2018. 818 s.
- 9 Spravochnik texnologa / A.G. Suslov, V.F. Bez`yazy`chny`j, B.M. Bazrov i dr.: pod obshh. red. A.G. Suslova. M.: Innovacionnoe mashinostroenie. 2019. 800 s.
- 10 Borisova O.M. Ximicheskie, fiziko-ximicheskie i fizicheskie metody` analiza / O.M. Borisova, V.D. Sal`nikov. M.: Metallurgiya, 1991. 268 s.
- 11 Teplouxov A.A., Izmerenie mikrotverdosti poverxnostny'x sloev materialov / A.A. Teplouxov. Omsk: Izd-vo OmGTU. 2017. 35 s.
- 12 El-Taweel T.A. Performance analysis of wire electrochemical turning process – RSM approach / T.A. El-Taweel, S.A. Glouda // Int. J/ Adv. Manuf. Technol. 2011. P. 181-190.
- 13 Dikova T. Surface morphology of pure titanium after anodization / T. Dikova // Machines, technologies, materials. 2014. №12. P. 3–7.
- 14 Park H. Characterization of highly ordered TiO₂ nanotube arrays obtained by anodic oxidation / N. Park, H. – G. Kim, W. – Y. Choi // Transactions on electrical and electronical materials. 2010. Volume 11. № 3. P. 112-115.

© Болдырев А.И., Болдырев А.А., Перова А.В., Григораш В.В., Падурец А.А., 2023