

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В АТМОСФЕРЕ АРГОНА НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ТИТАНОВОЙ ФОЛЬГИ

Методами оптической микроскопии, энергодисперсионного анализа исследована структура и элементный состав титановой фольги, прошедшей отжиг в инертной атмосфере в присутствии углеводородов. Проведенные термические обработки моделировали процесс синтеза многостенных углеродных нанотрубок. В результате обработок существенно снижается пластичность исследуемого материала. Показано, что в результате отжига изменяется структура фольги. С увеличением температуры отжига наблюдается рост концентраций углерода и кислорода, а также существенно увеличивается твердость материала, что, вероятно, связано с формированием в структуре фольги оксида титана и карбида титана.

Ключевые слова: титан, термическая обработка, оптическая микроскопия, энергодисперсионный анализ, механические свойства.

В настоящее время весьма активно развивается отрасль литий-ионных аккумуляторов и суперконденсаторов [1, 2]. Перспективным направлением развития отрасли химических источников тока является разработка гибких устройств накопления энергии [3]. В качестве электродного материала зачастую используются углеродные наноматериалы, например, многостенные углеродные нанотрубки (МУНТ), которые обеспечивают высокие значения электрической проводимости и удельной площади поверхности [4]. Применение титановой фольги в качестве основы для создания электродов суперконденсаторов обусловлено электрохимической стабильностью, стойкостью к коррозии, а также высокой электрической проводимостью титана [5]. К проблемам создания гибких электродов суперконденсаторов можно отнести слабую адгезию электродного материала к подложке, что приводит к разрушению электродов при деформациях. Одним из вариантов решения этой проблемы является синтез углеродных материалов непосредственно на электроде. Такая конфигурация электрода позволит создавать гибкие устройства с низким электрическим сопротивлением и развитой поверхностью, что обеспечивает высокие емкостные свойства готовых устройств. Одним из наиболее часто используемых способов получения МУНТ является

метод CVD (chemical vapor deposition). Данный метод синтеза основан на пиролизе углеводородов в присутствии катализаторов роста. При таком методе синтеза титановая основа подвергается нагреву до 900 °С в атмосфере, насыщенной углеводородами [6]. Подобные режимы термической обработки титановых сплавов в литературе описаны недостаточно и требуют дополнительных исследований. Целью данной работы является исследование структурных характеристик титановой фольги после температурных обработок в среде, насыщенной углеводородами.

Методика эксперимента. Объектом исследования в работе являлась фольга из технической чистого титана марки ВТ1-0, толщиной 50 мкм. Термическая обработка образцов проводилась в трубчатой печи при температурах 700, 750, 800, 850, 900 °С, время выдержки составляло 30 минут. Процесс проходил следующим образом: в зону печи помещались образцы титановой фольги, после чего проводилась откачка рабочего объема до остаточного давления 20 Па с последующим заполнением рабочего объема камеры аргоном высокой чистоты до атмосферного давления. Нагрев образцов проходил совместно с печью со скоростью 30 К/мин. После выхода печи на рабочую температуру в объем камеры подавался ацетонитрил (CH₃CN) в качестве углеводород-

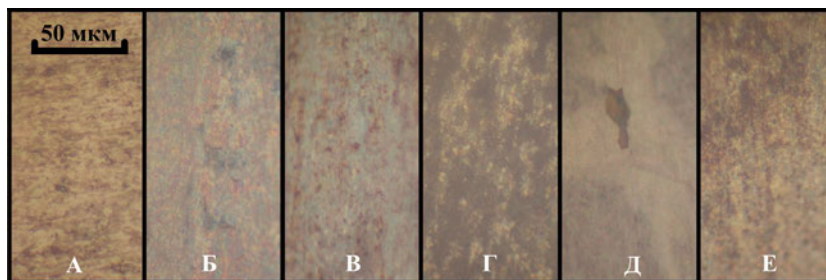


Рис. 1. Поверхность титановой фольги до и после отжига в среде ацетонитрила:

А — до отжига; Б — температура отжига 700 °С;
 В — температура отжига 750 °С; Г — температура отжига 800 °С;
 Д — температура отжига 850 °С; Е — температура отжига 900 °С

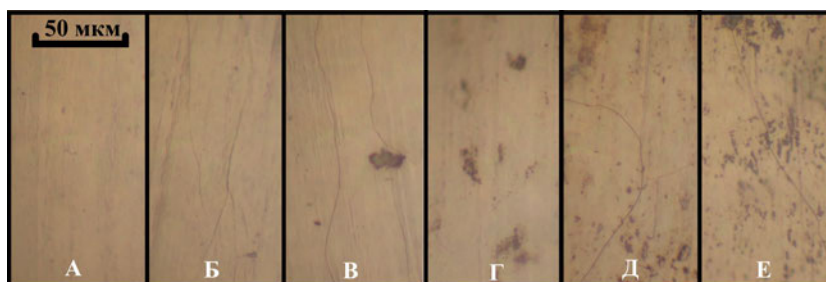


Рис. 2. Структура титановой фольги до и после отжига в среде ацетонитрила:

А — до отжига; Б — температура отжига 700 °С; В — температура отжига 750 °С;
 Г — температура отжига 800 °С; Д — температура отжига 850 °С;
 Е — температура отжига 900 °С

ного сырья со скоростью 50 мл/мин. Охлаждение до комнатной температуры проводилось с печью. Данный режим термообработки позволяет экспериментально смоделировать условия, возникающие при синтезе углеродных нанотрубок.

Удаление приповерхностных окисленных слоев образцов проводилось методом ионной полировки поверхности ионами аргона (Ar^+) с ускоряющим напряжением 5 кВ и током ионов 2 мА в течение трех часов.

Изменение структуры и элементного состава титановой фольги в результате термической обработки исследовалось методами оптической микроскопии на микроскопе Альтами МЕТ-3С. Исследование элементного состава образцов проводилось методом энергодисперсионного анализа (ЭДА), реализованным в растровом электронном микроскопе Jeol JSM-5700, оснащенный энергодисперсионным анализатором jed-2300 (Омский государственный технический университет (ОмГТУ), г. Омск). Глубина поверхностного слоя, анализируемого методом энергодисперсионного анализа (ЭДА) для исследуемых сплавов составляет ~ 0,5 мкм. Изменение твердости образцов в результате термической обработки определялось по методу Викерса на микротвердомере Shimadzu HNV-2 при нагрузке на индентор 245,2 мН.

Экспериментальные результаты. При отжиге в воздушной среде при указанных температурах протекают процессы рекристаллизации и восстановления равноосной структуры титана после проката. Помимо рекристаллизации на поверхности титановой фольги формируется оксидная пленка, защищающая от проникновения газов в структуру материала. При этом термообработка титана и его сплавов в воздушной среде не должна оказывать негативных последствий на эксплуатационные свойства материала, в частности на пластичность

[7, 8]. Однако в результате проведенных в работе термических обработок наблюдается существенное ухудшение пластичности и охрупчивание фольги.

На рис. 1 представлены микрофотографии титановой фольги при различных режимах термической обработки. Из полученных результатов видно, что в результате отжига на поверхности образцов формируются множественные очаги коррозии и включения карбида титана (TiC), маскирующие поверхность титановой фольги. Видно, что с увеличением температуры отжига несколько изменяется цвет поверхности, что может быть обусловлено различной толщиной оксидной пленки на поверхности образцов. Формирование оксидной пленки не позволяет оценить изменение структуры фольги после различных режимов отжига.

Для исследования изменения структуры титановой фольги в результате термической обработки поверхность образцов полировалась пучком ионов аргона для удаления окисленного слоя (рис. 2). На изображениях оптической микроскопии титановой фольги до термообработок (рис. 2А) не наблюдается зерен α -фазы титана, что может быть связано с наличием субмикронных зерен, не разрешающихся в оптической микроскопии. Такая структура может быть сформирована в результате высокой степени деформации при холодной прокатке [9].

На рис. 2 видно, что в результате термических обработок формируются нитевидные структуры, напоминающие границы зерен, преимущественно вдоль направления проката. При этом непосредственно равноосной зеренной структуры, характерной для титана и α -титановых сплавов после отжига, не наблюдается [10]. Так же на изображениях включения, предположительно оксида титана и карбида титана. С увеличением температуры количество включений и их размеры увеличиваются (рис. 2В – Е).

Таблица 1

Данные количественного элементного состава титановой фольги до и после различных режимов отжига. Все результаты в весовых процентах

Образец	[C]	[O]	[Ti]
Исходный	2,02	2,18	95,8
Отжиг 700 °С	3,05	6,4	90,55
Отжиг 900 °С	5,11	11,9	82,99

Таблица 2

Результаты измерения твердости

Образец	Исходный	700 °С	750 °С	800 °С	850 °С	900 °С
Твердость, HV	286	445	499	833	916	1112

Проведенные исследования методом энергодисперсионного анализа показали изменения в элементном составе титановой фольги при увеличении температуры отжига (табл. 1).

Данные элементного анализа указывают на увеличение концентрации кислорода и углерода после отжига. Полученный результат коррелирует с данными микроскопии. Увеличение концентрации кислорода в составе образцов обусловлено присутствием остаточной атмосферы при вакуумировании и, вероятно, образованием оксида титана и карбида титана в результате отжигов.

Отжиги оказывают существенное влияние на структуру и элементный состав титановой фольги, что сказывается и на механических свойствах исследуемых образцов. Проведенные исследования твердости титановой фольги (табл. 2) показали, что с увеличением температуры отжига наблюдается увеличение твердости титановой фольги.

Исходя из полученных данных, твердость титановой фольги после отжигов увеличивается более чем в три раза, при этом существенно снижается пластичность.

Обсуждение. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. В результате отжигов в инертной среде в присутствии углеводородов происходит насыщение поверхности фольги как углеродом, так и кислородом. На это указывают изображения, полученные методом оптической микроскопии, а также данные ЭДА анализа. Особенностью проведения операций отжига титана в присутствии малых концентраций кислорода является невозможность формирования сплошной пленки оксида титана, пассивирующей поверхность и предотвращающей диффузию кислорода и в глубь материала. В результате в течение отжига формируются окисленные газонасыщенные слои с высоким содержанием кислорода (до 14 % в α -фазе титана) [11]. В работе термическая обработка проводилась в среде аргона в присутствии ацетонитрила. При этом в печи при данных температурах происходит пиролиз ацетонитрила с выделением цианистого водорода (HCN), метана (CH₄) и цианометила (C₂HCN) [12], а также кислорода, входящего в состав остаточной атмосферы после вакуумирования; следует ожидать, что приповерхностные слои также насыщаются водородом. Авторы работ [13, 14] указывают на возможность формирования карбида

титана при термической обработке титана в непосредственном взаимодействии с источником углерода. Условия проведения отжига в данной работе, а именно температура и углеродная среда также способствуют науглероживанию поверхности образца и формированию карбида титана в структуре фольги. При этом результаты ЭДА анализа указывают на увеличение концентрации углерода и кислорода с увеличением температуры отжига, в то же время на изображениях оптической микроскопии также наблюдается увеличение количества включений в структуре титана. Вероятно, в структуре титана в процессе отжига происходит формирование оксидов и карбидов титана. Также увеличение содержания карбида и оксида титана в структуре фольги приводит к росту твердости материала, однако это существенно снижает эксплуатационные свойства титановой фольги в качестве электродов суперконденсаторов, поскольку снижает пластичность материала.

Заключение. Проведенные в работе исследования показали существенные структурные изменения титановой фольги в результате отжига в инертной атмосфере в присутствии углеводородов. Рост концентраций кислорода и углерода в образцах после отжига и анализ литературных источников позволяют предположить формирование включений оксида титана и карбида титана в структуре титановой фольги. С увеличением температуры отжига количество включений увеличивается. Структурные изменения сопровождаются существенным ростом твердости фольги. Поскольку режимы термической обработки и состав рабочей атмосферы подбирались с учетом возможного синтеза слоя углеродных нанотрубок на поверхности фольги, наиболее предпочтительным режимом синтеза вертикально ориентированных углеродных нанотрубок на поверхности титановой фольги является пиролиз при 700 °С, поскольку позволяет сохранить удовлетворительные эксплуатационные свойства титановой основы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках программы «Приоритет 2030». В работе использовано оборудование научно-образовательного ресурсного центра ОмГТУ «Нанотехнологии».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

1. Михеев К. Г., Сюгаев А. В., Зонов Р. Г. [и др.]. Лазерно-индуцированный графен и его модификация полипирролом для увеличения емкости микросуперконденсатора // Физика твердого тела. 2023. Т. 65, № 2. С. 353–360. DOI: 10.21883/FTT.2023.02.54313.529.
2. Muzaffar A., Ahamed M. B., Deshmukh K. [et al.]. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 101. P. 123–145. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.026.
3. Palchoudhury S., Ramasamy K., Ram K. Gupta [et al.]. Flexible Supercapacitors: A Materials Perspective // Frontiers in Materials. 2019. Vol. 5. 83. DOI: 10.3389/fmats.2018.00083.
4. Лобов И. А., Давлеткильдеев Н. А., Несов С. Н. [et al.]. Структура межфазной границы полианилин-углеродная нанотрубка // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, № 12. С. 7–10. DOI: 10.21883/PJTF.2022.12.52670.19193.
5. Lu X., Li F., Steimecke M. [et al.]. Titanium as a Substrate for Three-Dimensional Hybrid Electrodes for Vanadium Redox Flow Battery Applications // ChemElectroChem. 2020. Vol. 7. P. 737–744. DOI: 10.1002/celec.201901896.
6. Szaby A., Andricevic P., Pбра Z. [et al.]. Growth of CNT Forests on Titanium Based Layers, Detailed Study of Catalysts // Frontiers in Materials. 2018. Vol. 6. 593. DOI: 10.3389/fchem.2018.00593.
7. Казаченко М. С., Панин А. В., Иванов Ю. Ф. [и др.]. Влияние термического отжига на механическое поведение технического титана ВТ1-0, имеющего субмикроструктурную структуру в поверхностном слое или в объеме материала // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8, № 4. С. 37–47.
8. Спивак Л. В., Щепина Н. Е. Особенности полиморфного превращения в титане // Журнал технической физики. 2021. Т. 91, № 8. С. 1233–1238. DOI: 10.21883/JTF.2021.08.51096.53-21s.
9. Лопатин Н. В., Дьяконов Г. С., Жеребцов С. В. [и др.]. Структура и механические свойства наноструктурного листа из титана ВТ1-0, полученного холодной прокаткой // Научные ведомости. Серия: Математика. Физика. 2010. Т. 82, № 11. С. 69–77.
10. Грязнов М. Ю., Шотин С. В., Чувиладель В. Н. [и др.]. Улучшение физико-механических характеристик нелегированного титана ВТ1-0 и исследование влияния на них режимов селективного лазерного сплавления // Журнал технической физики. 2023. Т. 93, № 2. С. 241–248. DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54499.209-22.
11. Булков А. Б., Пешков В. В., Селиванов В. Ф. [и др.]. Кинетика роста газонасыщенных (охрупченных) слоев на титане при вакуумном отжиге // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16, № 2. С. 142–148. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.2.019.
12. Youngprasert B., Poochinda K., Ngamprasertsith S. Treatment of Acetonitrile by Catalytic Supercritical Water Oxidation in Compact-Sized Reactor // J. Water Resource and Protection. 2010. Vol. 2. P. 222–226. DOI: 10.4236/jwarp.2010.23025.
13. Tan Y., Xu L., Xu Z. [et al.]. Effects of Ti foil thickness on microstructures and mechanical properties of in situ

synthesized micro-laminated TiC/Ti composites // Materials Science & Engineering A. 2019. Vol. 767. 138296. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138296.

14. Wang N., Choi Y., Oue K. [et al.]. Fabrication of in-situ rod-like TiC particles dispersed Ti matrix composite using graphite power sheet // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. 19154. DOI: 10.1038/s41598-022-23796-4.

КНЯЗЕВ Егор Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник Омского научного центра СО РАН, г. Омск; доцент кафедры «Машиностроение и материаловедение» Машиностроительного института Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2980-1947

AuthorID (РИНЦ): 666119

ORCID: 0000-0001-6450-5364

AuthorID (SCOPUS): 55657278600

ResearcherID: AAU-4486-2020

Адрес для переписки: knyazevyegor@mail.ru

БАДАМШИН Артем Маратович, старший преподаватель кафедры «Машиностроение и материаловедение» Машиностроительного института ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3531-5945

AuthorID (РИНЦ): 1032513

AuthorID (SCOPUS): 57211271253

ResearcherID: AAA-3846-2019

Адрес для переписки: artembadamschin@mail.ru

СТЕНЬКИН Юрий Алексеевич, кандидат химических наук, научный сотрудник Омского научного центра СО РАН, г. Омск.

AuthorID (РИНЦ): 150801

ORCID: 0000-0003-0840-9137

AuthorID (SCOPUS): 19639375100

ResearcherID: AAN-1001-2021

Адрес для переписки: sten@obisp.oscsbras.ru

РОГАЧЕВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), директор научно-образовательного ресурсного центра нанотехнологий «Наноцентр», доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1373-4622

AuthorID (РИНЦ): 670217

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

Адрес для переписки: evg.rogachev@yandex.ru

Для цитирования

Князев Е. В., Бадамшин А. М., Стенькин Ю. А., Рогачев Е. А. Исследование влияния термической обработки в атмосфере аргона на физико-химическое состояние титановой фольги // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-35-40.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.

© Е. В. Князев, А. М. Бадамшин,

Ю. А. Стенькин, Е. А. Рогачев

THE ANALYSIS OF THE EFFECT OF HEAT TREATMENT IN VARIOUS ATMOSPHERES ON THE STRUCTURE OF TITANIUM FOIL

The structure and elemental composition of titanium foil annealed in an inert ambient in the presence of hydrocarbons are studied by optical microscopy and scanning electron microscopy. The heat treatments carried out are simulated the synthesis process of multi-walled carbon nanotubes. As a result of the treatments, the plasticity of the material under study is significantly reduced. It is shown that the structure of the foil changes as a result of annealing. With an increase in the annealing temperature, an increase in carbon and oxygen concentrations is observed, and the hardness of the material increases significantly, which is probably due to the formation of titanium oxide and titanium carbide in the foil structure.

Keywords: titanium, heat treatment, optical microscopy, energy dispersion analysis, mechanical properties.

Acknowledgments

The work is carried out within the framework of the «Priority 2030» program. The equipment of the Scientific and Educational Resource Centre of Omsk State Technical University «Nanotechnologies» is used in the work.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

References

1. Mikheyev K. G., Syugayev A. V., Zonov R. G. [et al.]. Lazerno-indutsirovanny grafen i ego modifikatsiya polipirrolom dlya uvelicheniya emkosti mikrosuperkondensatora [Laser-induced graphene and its modification with polypyrrole for increasing microsupercapacitor capacitance] // Fizika tverdogo tela. *Physics of the Solid State*. 2023. Vol. 65, no. 2. P. 347–354. DOI: 10.21883/FTT.2023.02.54313.529. (In Russ.).
2. Muzaffar A., Ahamed M. B., Deshmukh K. [et al.]. A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 101. P. 123–145. DOI: 10.1016/j.rser.2018.10.026. (In Engl.).
3. Palchoudhury S., Ramasamy K., Ram K. Gupta [et al.]. Flexible Supercapacitors: A Materials Perspective // Frontiers in Materials. 2019. Vol. 5. 83. DOI: 10.3389/fmats.2018.00083. (In Engl.).
4. Lobov I. A., Davletkil'deyev N. A., Nesov S. N. [et al.]. Struktura mezhfaznoy granitsy polianilin-uglerodnaya nanotrubka [Structure of the polyaniline-carbon nanotube interface] // Pis'ma v ZhTF. *Technical Physics Letters*. 2022. Vol. 48, no. 12. P. 7–10. DOI: 10.21883/PJTF.2022.12.52670.19193. (In Russ.).
5. Lu X., Li F., Steimecke M. [et al.]. Titanium as a Substrate for Three-Dimensional Hybrid Electrodes for Vanadium Redox Flow Battery Applications // ChemElectroChem. 2020. Vol. 7. P. 737–744. DOI: 10.1002/celc.201901896. (In Engl.).
6. Szabó A., Andricevic P., Pápa Z. [et al.]. Growth of CNT Forests on Titanium Based Layers, Detailed Study of Catalysts // Frontiers in Materials. 2018. Vol. 6. 593. DOI: 10.3389/fchem.2018.00593. (In Engl.).
7. Kazachenok M. S., Panin A. V., Ivanov Yu. F. [i dr.]. Vliyaniye termicheskogo otzhiga na mekhanicheskoye povedeniye tekhnicheskogo titana VT1-0, imeyushchego submikrokristallicheskuyu strukturu v poverkhnostnom sloye ili v ob'yeme materiala [Effect of thermal annealing on the mechanical behavior on commercial titanium VT1-0 with submicrocrystalline structure in the surface layer or material bulk] // Fizicheskaya mezomekhanika. *Physical Mesomechanics*. 2005. Vol. 8, no. 4. P. 37–47. (In Russ.).
8. Spivak L. V., Shchepina N. E. Osobennosti polimorfnoy prevrashcheniya v titane [Features of polymorphic transformation in titanium] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. *Technical Physics*. 2021. Vol. 91, no. 8. P. 1233–1238. DOI: 10.21883/JTF.2021.08.51096.53-21s. (In Russ.).

9. Lopatin N. V., D'yakov G. S., Zherebtsov S. V. [et al.]. Struktura i mekhanicheskiye svoystva nanostrukturnogo lista iz titana VT1-0, poluchennogo kholodnoy prokatkoy [Structure and mechanical properties of nanostructured sheet of titanium VT1-0 produced by cold rolling] // Nauchnyye vedomosti. Seriya Matematika. Fizika. *Scientific Bulletin of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics.* 2010. Vol. 82, no. 11. P. 69–77. (In Russ.).

10. Gryaznov M. Yu., Shotin S. V., Chuvil'deyev V. N. [et al.]. Uluchsheniye fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik nelegirovannogo titana VT1-0 i issledovaniye vliyaniya na nikh rezhimov selektivnogo lazernogo splavljeniya [Improving the physical and mechanical characteristics of unalloyed titanium VT1-0 and studying the effect of selective laser melting parameters] // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. *Technical Physics.* 2023. Vol. 93, no. 2. P. 241–248. DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54499.209-22. (In Russ.).

11. Bulkov A. B., Peshkov V. V., Selivanov V. F. [et al.]. Kinetika rosta gazonasyschennykh (okhrupchennykh) sloyev na titane pri vakuumnom otzhige [Kinetics of growth of gas-saturated (embroken) layers on titanium at vacuum annealing] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. *Bulletin of Voronezh State Technical University.* 2020. Vol. 16, no. 2. P. 142–148. DOI: 10.25987/VSTU.2020.16.2.019. (In Russ.).

12. Youngprasert B., Poochinda K., Ngamprasertsith S. Treatment of Acetonitrile by Catalytic Supercritical Water Oxidation in Compact-Sized Reactor // *J. Water Resource and Protection.* 2010. Vol. 2. P. 222–226. DOI: 10.4236/jwarp.2010.23025. (In Engl.).

13. Tan Y., Xu L., Xu Z. [et al.]. Effects of Ti foil thickness on microstructures and mechanical properties of in situ synthesized micro-laminated TiC/Ti composites // *Materials Science & Engineering A.* 2019. Vol. 767. 138296. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138296. (In Engl.).

14. Wang N., Choi Y., Oue K. [et al.]. Fabrication of in-situ rod-like TiC particles dispersed Ti matrix composite using graphite power sheet // *Scientific Reports.* 2022. Vol. 12. 19154. DOI: 10.1038/s41598-022-23796-4. (In Engl.).

KNYAZEV Egor Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Researcher of Omsk Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Science, Omsk; Associate Professor of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Mechanical Engineering Institute, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2980-1947

AuthorID (RSCI): 666119

ORCID: 0000-0001-6450-5364

AuthorID (SCOPUS): 55657278600

ResearcherID: AAU-4486-2020

Correspondence address: knyazevyegor@mail.ru

BADAMSHIN Artem Maratovich, Senior Lecturer of Mechanical Engineering and Materials Science Department, Mechanical Engineering Institute, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3531-5945

AuthorID (RSCI): 1032513

AuthorID (SCOPUS): 57211271253

ResearcherID: AAA-3846-2019

Correspondence address: artembadamschin@mail.ru

STENKIN Yuriy Alekseyevich, Candidate of Chemical Sciences, Researcher of Omsk Scientific Center Siberian Branch Russian Academy of Science, Omsk.

AuthorID (RSCI): 150801

ORCID: 0000-0003-0840-9137

AuthorID (SCOPUS): 19639375100

ResearcherID: AAN-1001-2021

Correspondence address: sten@obisp.oscsbras.ru

ROGACHEV Evgeniy Anatolyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Scientific and Educational Resource Centre for Nanotechnologies «Nanocentre», Associate Professor of Physics Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1373-4622

AuthorID (RSCI): 670217

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

Correspondence address: evg.rogachev@yandex.ru

For citations

Knyazev E. V., Badamshin A. M., Stenkin Yu. A., Rogachev E. A. The analysis of the effect of heat treatment in various atmospheres on the structure of titanium foil // *Omsk Scientific Bulletin.* 2024. No. 1 (189). P. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-35-40.

Received September 1, 2023.

© E. V. Knyazev, A. M. Badamshin,

Yu. A. Stenkin, E. A. Rogachev