

ISSN 2518-1483 (Online),
ISSN 2224-5227 (Print)

**ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES**

**№3
2026**

ISSN 2518-1483 (Online),
ISSN 2224-5227 (Print)

2026 • 3



ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

PUBLISHED SINCE JANUARY 1944

ALMATY, NAS RK

Editor-in-Chief:

ZHURINOV Murat Zhurinovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of IAAS and NAS RK, General Director of the Research Institute of Petroleum Refining and Petrochemicals (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960> <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Editorial Board:

KALIMOLDAYEV Maksat Nuradilovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ADEKENOV Sergazy Mynzhasarovich, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Director of the JSC "Phytochemistry Research and Production Center", (Karaganda, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

RAMAZANOV Tlekkaul Sabitovich, (Deputy Editor-in-Chief), Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

ABIEV Rufat, Doctor of Technical Sciences (Biochemistry), Professor, Head of the Department of Optimization of Chemical and Biotechnological Equipment, St. Petersburg State Technological Institute (St. Petersburg, Russia), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

OLIVIERO Rossi Cesare, PhD (Chemistry), Professor at the University of Calabria (Calabria, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

TIGINYANU Ion Mihailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician, President of the Academy of Sciences of Moldova, Technical University of Moldova (Chisinau, Moldova), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

SANG SU Kwak, PhD (Biochemistry, Agricultural Chemistry), Professor, Chief Scientist, Research Center for Plant Systems Engineering, Korea Research Institute of Bioscience and Biotechnology (KRIBB), (Daecheon, Korea), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

BERSIMBAYEV Rakhmetkazhi Iskenderovich, Doctor of Biological Sciences, Professor, Academician of NAS RK, L.N. Gumilyov Eurasian National University (Astana, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

CALANDRA Pietro, PhD (Physics), Professor, Institute for the Study of Nanostructured Materials (Rome, Italy), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

BOSHKAEV Kuantai Avgazyevich, PhD, Associate Professor, Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

BURKITBAEV Mukhambetkali, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan) <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, Professor, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Institute of Nuclear Sciences (Mexico City, Mexico), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ZHUSUPOV Marat Abzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Theoretical and Nuclear Physics, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

KOVALEV Alexander Mikhailovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of NAS of Ukraine, Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk, Ukraine), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

TAKIBAEV Nurgali Zhabagaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

KHARIN Stanislav Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of NAS RK, Kazakh-British Technical University (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ABISHEV Medeu Erzhanovich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Corresponding Member of NAS RK, (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ABILMAGZHANOV Arlan Zainutallaevich, PhD in Chemistry, First Deputy Director General of JSC "Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky", (Almaty, Kazakhstan), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES.

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Owner: «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Committee of Information of the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan № **KZ93VPY00121157** issued **05.06.2025**

Thematic scope: *physics and chemistry*.

Periodicity: 4 times a year.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Бас редактор:

ЖҰРЫНОВ Мұрат Жұрыңұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ХҒАҚ және ҚР ҰҒА академигі, Мұнай өңдеу және мұнай-химиясы ғылыми-зерттеу институтының бас директоры (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cp%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакция ұжымы:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нұрәділұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

ӘДЕКЕНОВ Серғазы Мыңжасарұлы, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, "Фитохимия" ғылыми-өндірістік орталығы " АҚ директоры (Қарағанды, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тілеккабыл Сәбитұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

ӘБИЕВ Руфат, техника ғылымдарының докторы (биохимия), профессор, Санкт-Петербург мемлекеттік технологиялық институты «Химиялық және биотехнологиялық аппаратураны оңтайландыру» кафедрасының меңгерушісі, (Санкт-Петербург, Ресей), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Сесаре, PhD (химия), Калабрия университетінің профессоры (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

ТИГІНЯНУ Ион Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, академик, Молдова Ғылым Академиясының президенті, Молдова техникалық университеті (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

САНГ-СУ Квак, PhD (биохимия, агрохимия), профессор, Корея Биология және биотехнология ғылыми-зерттеу институты (KRIIBV), өсімдіктердің инженерлік жүйелері ғылыми-зерттеу орталығының бас ғылыми қызметкері, (Дэчон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСІМБАЕВ Рахметқажы Ескендірұлы, биология ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті. (Астана, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, PhD (физика), нанотехнология материалдары зерттеу институтының профессоры (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Қуантай Авғазыұлы, Ph.D. Теориялық және ядролық физика кафедрасының доценті, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БҮРКІТБАЕВ Мұхамбетқали, химия ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Мексика ұлттық автономиялық университеті (UNAM), Ядролық ғылымдар институты (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ЖҮСІПОВ Марат Абжанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, теориялық және ядролық физика кафедрасының профессоры, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, физика-математика ғылымдарының докторы, Украина ҰҒА академигі, Қолданбалы математика және механика институты (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нұрғали Жабағұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

ӘБІШЕВ Медеу Ержанұлы, физика-математика ғылымдарының докторы, профессор, ҚР ҰҒА академигі, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

ӘБІЛМАҒЖАНОВ Арлан Зайнуталлайұлы, химия ғылымдарының кандидаты, Д.В. Сокольский атындағы "Отын, катализ және электрохимия институты" АҚ Бас директорының бірінші орынбасары, (Алматы, Қазақстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Меншіктеуші: «Орталық Азия академиялық ғылыми орталығы» ЖШС (Алматы қ.).

Ақпарат агенттігінің мерзімді баспасөз басылымын, ақпарат агенттігін және желілік басылымды қайта есепке қою туралы ҚР Мәдениет және Ақпарат министрлігі «Ақпарат комитеті» Республикалық мемлекеттік мекемесі 05.06.2025 ж. берген № KZ93VPY00121157 Куәлік.

Тақырыптық бағыты: физика, химия.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Главный редактор:

ЖУРИНОВ Мурат Журинович, доктор химических наук, профессор, академик МАН и НАН РК, Генеральный директор НИИ нефтепереработки и нефтехимии (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602177960%3Cbr%3Ehttps://www.webofscience.com/wos/author/record/2017489>

Редакционная коллегия:

КАЛИМОЛДАЕВ Максат Нурадилович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=56153126500>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2428551>

АДЕКЕНОВ Сергезы Мынжасарович, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, директор АО "Научно-производственного центра "Фитохимия" (Караганда, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006153118>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/48648658>

РАМАЗАНОВ Тлеккабул Сабитович, (заместитель главного редактора), доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701328029>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/13503476>

АБИЕВ Руфат, доктор технических наук (биохимия), профессор, заведующий кафедрой «Оптимизация химической и биотехнологической аппаратуры», Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Санкт-Петербург, Россия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602431781>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1405661>

ОЛИВЬЕРО Росси Чезаре, доктор философии (PhD, химия), профессор Университета Калабрии (Калабрия, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221375979>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/399768>

ТИГИНЯНУ Ион Михайлович, доктор физико-математических наук, академик, президент Академии наук Молдовы, Технический университет Молдовы (Кишинев, Молдова), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7006315935>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/524462>

САНГ-СУ Квак, доктор философии (PhD, биохимия, агрохимия), профессор, главный научный сотрудник, Научно-исследовательский центр инженерных систем растений, Корейский научно-исследовательский институт бионауки и биотехнологии (KRIBB), (Дэжон, Корея), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=59286321700>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30028581>

БЕРСИМБАЕВ Рахметкажи Искендинович, доктор биологических наук, профессор, академик НАН РК, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (Астана, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004012398>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/19854255>

КАЛАНДРА Пьетро, доктор философии (PhD, физика), профессор Института по изучению наноструктурированных материалов (Рим, Италия), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7004303066>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/616360>

БОШКАЕВ Куантай Авгазыевич, PhD, преподаватель, доцент кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=54883880400>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2080231>

БУРКИТБАЕВ Мухамбеткали, доктор химических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=8513885600>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/29017135>

QUEVEDO Hernando, профессор, Национальный автономный университет Мексики (UNAM), Институт ядерных наук (Мехико, Мексика), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=55989741100>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/30353742>

ЖУСУПОВ Марат Абжанович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и ядерной физики, Казахский национальный университет им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6602166928>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/566>

КОВАЛЕВ Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, академик НАН Украины, Институт прикладной математики и механики (Донецк, Украина), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7202799321>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/65533963>

ТАКИБАЕВ Нурғали Жабағаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=24077239000>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1671760>

ХАРИН Станислав Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6701353063>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2023295>

АБИШЕВ Медеу Ержанович, доктор физико-математических наук, профессор, академик НАН РК, (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26530759900>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/1556025>

АБИЛМАТЖАНОВ Арлан Зайнуталлаевич, кандидат химических наук, первый заместитель генерального директора АО «Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В. Сокольского», (Алматы, Казахстан), <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57197468109>, <https://www.webofscience.com/wos/author/record/2024265>

ACADEMIC JOURNAL OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

Собственник: ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр» (г. Алматы).

Свидетельство № KZ93VPY00121157 о повторной регистрации периодического печатного издания информационного агентства, информационного агентства и сетевого издания, выданное Республиканским государственным учреждением «Комитет информации» Министерства культуры и информации Республики Казахстан 05.06.2025

Тематическая направленность: физика, химия.

Периодичность: 4 раза в год.

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

© ТОО «Центрально-азиатский академический научный центр», 2026

CONTENTS

PHYSICS

Aliuly A., Kaltayev A.

Aliuly A., Kaltayev A. Assessment of the Applicability of Similarity Laws for Centrifugal Pump Scaling Based on Hydrodynamic Modeling.....14

Baratov A.G., Sailaubek A., Serik A.S.

Synthesis and Investigation of a Narrow-Bandgap SrTaO₂N-Based Photocatalyst.....33

Nurbayev B., Dmitriyeva E., Kemelbekova A.

Modern Methods of Selective Lithium Leaching from Spent Lithium-Ion Batteries.....45

Seitov A., Amanzholov T.

Comparative Analysis of One-Dimensional Physical-Hydrodynamic Models of Centrifugal Flow in an Impeller for Mineralized Media.....60

Syzdykova A.M., Serikbayev N.S., Kutum B.B.

Local Kodama-Type Transformations and Integrability Limits of the Extended Fifth-Order Korteweg-de Vries Equation.....83

Ualikhanova U.A., Ussipkyzy T., Altayeva G.S., Razina O.V.

Calculation of the Screened $f(T)$ Gravity Model.....101

Zhadyranova A.A., Tsyba P.Yu., Ismail U.K., Yerzhan B.

Divergence-Free Deceleration Parameter, Kinematic Constraints from DESI DR2 and Cosmic Chronometers.....123

Zhenishan K., Bekov S.S., Syzdykova A.M.

The Influence of Gaussian Process Parameters on Reconstructing the Hubble Constant.....146

CHEMISTRY

Amangeldi B., Zhanikulov N., Taimasov B., Aitureev M., Dauletiyarov M.

Research of the Firing Processes and Whiteness of White Cement Clinkers.....155

Baisalova G.Zh., Bauyrzhanova G.B., Niyaz G.A., Taltenov A.A., Ainabayev A.A.

Study of the Chemical Composition of Ethanol Extracts of Lady's Mantle by Gas Chromatography-Mass Spectrometry.....169

Bishimbaev V.K., Kapsalyamov B.A.

Hydrogeochemical Indicators of Sulfuric-Acid Uranium Leaching Impact on Groundwater in Shieli and Zhanakorgan Districts.....183

Darmenbayeva A.S., Aubakirova R.A. Nurgaliyeva D.A., Abylkassova G.E., Abilmazhinova G.A.

Structural and Morphological Features of Polymer-Metal Functional Materials.....205

Dyusebaeva M.A., Berganayeva A.E., Ibragimova N.A., Utaraliev D.M., Berganayeva G.E.

Green synthesis of silver nanoparticles using the n-butanol fraction of Galega officinalis L.....223

Dyussebekova S.B., Utarova D.A., Kuspanov Zh.B., Daulbayev Ch.B., Abdikarimova U.A. Investigation of the Effect of SrTiO ₃ Heat Treatment on the Photocatalytic Efficiency of the \	
Decomposition of an Amphoteric Antibiotic.....	239
Issayeva U.B., Akhmetova G.S., Praliyev K.D., Malmakova A.E., Seilkhanov T.M. 1-Benzyl-4-(p-Fluorobenzoyloxyimino)Piperidine Hydrochloride as a Candidate for	
an Anti-Infective Agent.....	252
Kamunur K., Yskak M., Mussapyrova L. Effect of Chemical Modification of Sodium Lignosulfonate on Flotation Properties in the	
Barite – Calcite System.....	264
Kononov A., Kamunur K., Mussapyrova L., Assylkhanova D., Batkal A. Obtaining and Studying the Inorganic Flocculant Al–Fe–Mn Based on Modified Bentonite.....	276
Kurmangaliyeva A.1, Akhmetova F.2, Kareshova Zh.1, Iskakov R. PDMA-Modified Tagan Bentonite for Hydrogen Production in Catalytic Conversion	
of Hydrocarbons.....	292
Kurtebayeva A.A., Silvia Álvarez-Torrellas., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Kalmakhanova M.S. Corn-Cob-Derived Fe-Modified Activated Carbons for Paracetamol and Sulfamethoxazole	
Removal by Adsorption and Oxidative Treatment.....	307
Nadirov R.K., Nurtazina N.D., Ryskaliyeva R.G. Response Surface Modelling and Optimisation of Ilmenite Flotation Using a Modified	
Lignosulphonate Reagent.....	334
Nefedov A.N., Taikenova A.T., Imashev B.K., Nurislamov R.M., Leontyeva X. Quantum Computing in the Modeling of Corrosion Processes.....	350
Nurkenov O.A., Fazylov S.D., Syzdykov A.K., Kabiyeva S.K., Zhaslan R.K. Synthesis and Structural Study of 3,5-Dimethylisoxazole Sulfone Derivatives with Secondary	
Amines.....	365
Orazbekova R.S., Tungatarova S.A., Baizhumanova T.S., Kaumenova G.B., Zhumabek M. Influence of Reaction Mixture Composition in Steam Reforming of Bioethanol on a High-Entropy	
Oxide Catalyst.....	382
Ryskaliyeva R.G., L.K. Beisembayeva, Osserov T.B. Hydrocyclone Classification of Balkhash Processing Plant Tailings.....	398
Sass A.S., Torlopov I.I., Rakhmetova K.S., Kenzin E.N., Zhurinov M. Formation and Maturation of Phosphate Coatings on Steel from an Alcohol-Based	
Phosphating Solution.....	418
Sdikova G.Zh., Dalabayeva N.S., Balkembay A.S., Sarova N.B., Zhaltyrbayeva N.K. Effect of Electrolyte Formulation on the Characteristics of Zinc-Based	
Electroplated Coatings.....	435
Seitkaliyeva N., Kussainova G., Zhursumbayeva M., Mohamad Ibrahim M.N., Abdiyev K. Study of the Flocculation Properties of Itaconic Acid-Based Copolymers.....	448

Sergazina S.M., Nurmukhanbetova N.N., Ostretsova I.B., Kamze A.R., Kassenova N.B. Comprehensive Assessment of Natural Drinking Water Quality and Statistical Analysis of Physicochemical Parameters.....	460
Talgatkyzy A., Nazhipkyzy M., Otenov A., Seitkazinova A., Issanbekova A. Wood Waste-Derived Organosolv Lignin-Based Carbon Nanofibers For Energy Storage Applications.....	475
Toktabayeva A.K., Makhayeva D.N., Rakhmetullayeva R.K., Rvaidarova G.O., Issenova G.D. Synthesis, Structure, and Physicochemical Properties of Sulfur-Containing Composites Based on Aniline, p-Phenylenediamine, Phenol, and Formaldehyde.....	498
Yeshmanova G.B., Smagulov D.U. Effect of Silicon-Based Particles on the Formation and Composition of PEO Coatings.....	517
Zhortarova A.A., Kubicek V., Ibrayev M.K., Panshina S.Y., Seidakhmetova R.B. N-Phosphorylation of Amino-thiazoles and Amino-Thiadiazoles with P(III)- and P(V)-Reagents: Synthesis, Structure, and Biological Activity.....	538
Zhussupova A., Tyumentseva O., Antonyuk V. Comparative Study of the Kinetics and Energy Characteristics of Planetary Milling of Copper Smelting Dump Slag and Granulated Lead-Smelting Slag.....	552

МАЗМҰНЫ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Гидродинамикалық модельдеу негізінде ортадан тепкіш сорғыларды масштабтауда ұқсастық заңдарының қолданылуын бағалау.....14

Баратов А.Ғ., Сайлаубек А., Серік А.С.

SrTaO_2N негізіндегі тар тыйым салынған аймақты фотокатализаторды алу және зерттеу.....33

Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.

Пайдаланылған литий-ионды аккумуляторлардан литийді селективті шаймалаудың заманауи әдістері.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Минералданған орталарға арналған жұмыс дөңгелегіндегі ортадан тепкіш ағыстың бірөлшемді физикалық–гидродинамикалық модельдерін салыстырмалы талдау.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Кенетейлген бесінші ретті Кортевег-де Фриз тендеуінің локалды кодам типті түрлендіруі мен интегралдану шектері.....83

Уалиханова У.А., Үсіпқызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.

Экрандалған $f(T)$ – гравитация моделінің есебі.....101

Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил Ү.Қ., Ержан Б.

Дивергенциясыз бәсеңдеу параметрі, DESI DR2 және космикалық хронометрлер деректері бойынша кинематикалық шектеулер.....123

Жеңіскан Қ., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Хаббл тұрақтысын реконструкциялауға Гаусстық процестер параметрлерінің әсері.....146

ХИМИЯ

Амангелді Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтүреев М., Даулетияров М.

Ақ цемент клинкерлерінің күйдіру процестерін және ақтығын зерттеу.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Газ хроматография-масс-спектрометрия әдісімен кәдімгі теңгежапырақ өсімдігінің этанолды сығындыларының химиялық құрамын зерттеу.....169

Бишимбаев В.К., Капсаямов Б.А.

Шиелі және Жаңақорған аудандарындағы уранды күкірт қышқылымен шаймалаудың жер асты суларына әсерінің гидрогеохимиялық көрсеткіштері.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нурғалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абилямжинова Г.А.

Полимер-металл функционалдық материалдардың құрылымдық-морфологиялық ерекшеліктері.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е.

Galega officinalis L. өсімдігінің N-бутанолдық фракциясы арқылы күміс нанобөлшектерін жасыл синтездеу.....223



Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Құспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Әбдікәрімова Ұ.Ә. Термиялық өңделген SrTiO ₃ фотокатализаторларының екідайлы антибиотикті тиімді ыдыратуын зерттеу.....	239
Исаева Ұ.Б., Ахметова Г.С., Пірәлиев Қ.Ж., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Жұқпалы ауруларға қарсы кандидат ретінде 1-бензил-4-(П-фторбензоилоксиимино) пиперидин гидрохлориді.....	252
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мусапирова Л. Барит–кальцит жүйесіндегі натрий лигносульфонатының флотациялық қасиеттеріне химиялық модификацияның әсері.....	264
Кононов А., Қамұнұр Қ., Мусапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Модификацияланған бентонит негізіндегі Al–Fe–Mn бейорганикалық флокулянтын алу және зерттеу.....	276
Қурманғалиева А.1, Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. Көмірсутектердің каталитикалық конверсиясы арқылы сутек алуға арналған ПДМА-модификацияланған таған бентониті.....	292
Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes H.T., Калмаханова М.С. Жүгері собықтарынан алынған темірмен модификацияланған белсендірілген көмірлермен парацетамол мен сульфаметоксазолды адсорбциялық-тотығу жолымен жою.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Модификацияланған лигносульфонатты реагентті қолдану арқылы ильменит флотациясының жауап бетін модельдеу және оңтайландыру.....	334
Нефедов А.Н., Тайекенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Коррозиялық процестерді модельдеудегі кванттық есептеулер.....	350
Нүркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздықов А.К., Қабиева С.Қ., Жаслан Р.К. Екіншілік аминдермен 3,5-диметилизоксазолдың сульфотуындыларын синтездеу және құрылымдық зерттеу.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жұмабек М. Жоғары энтропиялық оксид катализаторы қатысында биоэтанолдың бу риформингісіне реакциялық қоспа құрамының әсері.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Балқаш байыту фабрикасының байыту қалдықтарын гидроциклондық классификациялау.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Жұрынов М. Спирт негізіндегі фосфаттау ерітіндісінен болат бетінде фосфатты жабындардың қалыптасуы және жетілуі.....	418
Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Мырыш негізіндегі гальваникалық қаптамалардың қасиеттеріне электролит құрамының әсері.....	435

Сейтқалиева Н., Құсаинова Г., Жүрсімбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Әбдиев Қ. Итакон қышылы негізіндегі сополимерлердің флокуляциялық қасиеттерін зерттеу.....	448
Сергазина С.М., Нұрмұханбетова Н.Н., Острцова И.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Табиғи ауыз су сапасын кешенді бағалау және физика-химиялық көрсеткіштерге статистикалық талдау.....	460
Талгатқызы Ә., Нажиқызы М., Өтенов Ә., Сейтқазинаева Ә., Исанбекова А. Ағаш қалдықтарынан алынған органосольв лигнин негізіндегі көміртекті талшықтарды энергия сақтау жүйелерінде қолдану.....	475
Тоқтабаева Ә.Қ., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.Қ., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Анилин, п-фенилендиамин, фенол және формальдегид негізіндегі күкіртқұрамды композиттердің синтезі, құрылымы және физика-химиялық қасиеттері.....	498
Ешманова Г.Б., Смағұлов Д.У. Кремний негізіндегі бөлшектердің ПЭО жабындарының қалыптасуы мен құрамына әсері.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.Қ., Паньшина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. P(III) және P(V) реагенттерімен аминотиазолдар мен аминок-тиадиазолдарды N-фосфорлирлеу: синтезі, құрылымы және биологиялық белсенділігі.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Үйінді мыс балқыту шлагы мен қорғасын балқытудың түйіршіктелген шлагын планетарлық ұнтақтау кинетикасы мен энергетикасын салыстырмалы зерттеу.....	552

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА

Әлиұлы А., Калтаев А.

Оценка применимости законов подобия при масштабировании центробежных насосов на основе гидродинамического моделирования.....14

Баратов А.Г., Сайлаубек А., Серік А.С.Получение и исследование узкозонного фотокатализатора на основе SrTaO_2N33**Нұрбаев Б., Дмитриева Е., Кемелбекова А.**

Современные методы селективного выщелачивания лития из отработанных литий-ионных аккумуляторов.....45

Сейтов А.Н., Аманжолов Т.Е.

Сравнительный анализ одномерных физико-гидродинамических моделей центробежного течения в рабочем колесе для минерализованных сред.....60

Сыздыкова А.М., Серикбаев Н.С., Кутум Б.Б.

Локальные преобразование типа кодамы и пределы интегрируемости расширенного уравнения Кортевега-де Фриза пятого порядка.....83

Уалиханова У.А., Усипкызы Т., Алтаева Г.С., Разина О.В.Расчёт экранированной модели $f(T)$ -гравитации.....101**Жадыранова А.А., Цыба П.Ю., Исмаил У.Қ., Ержан Б.**

Дивергентно-свободный параметр замедления, кинематические ограничения по данным DESI DR2 и космических хронометров.....123

Женискан К., Беков С.С., Сыздыкова А.М.

Влияние параметров Гауссового процесса на реконструкцию постоянной Хаббла.....146

ХИМИЯ

Амангелди Б., Жаникулов Н., Таймасов Б., Айтурсев М., Даулетияров М.

Исследование процессов обжига и белизны клинкеров белых цементов.....155

Байсалова Г.Ж., Бауыржанова Г.Б., Нияз Г.А., Талтенов А.А., Айнабаев А.А.

Изучение химического состава этанольных экстрактов манжетки обыкновенной методом газ хроматографии-масс-спектрометрии.....169

Бишимбаев В.К., Капсалямов Б.А.

Гидрогеохимические индикаторы воздействия сернокислотного выщелачивания урана на подземные воды районов Шиели и Жанакоргана.....183

Дарменбаева А.С., Аубакирова Р.А., Нургалиева Д.А., Абылкасова Г.Е., Абилямажинова Г.А.

Структурно-морфологические особенности полимер-металлических функциональных материалов.....205

Дюсебаева М.А., Берганаева А.Е., Ибрагимова Н.А., Утаралиев Д.М., Берганаева Г.Е. Зеленый синтез серебряных наночастиц с использованием N-бутанольной фракции Galega officinalis L.....	223
Дюсембекова С.Б., Утарова Д.А., Куспанов Ж.Б., Даулбаев Ч.Б., Абдикаримова У.А. Исследование влияния термической обработки SrTiO ₃ на фотокаталитической эффективности разложения амфотерного антибиотика.....	239
Исаева У.Б., Ахметова Г.С., Пралиев К.Д., Малмакова А.Е., Сейлханов Т.М. Гидрохлорид 1-бензил-4-(п-фторбензоилоксиимино) пиперидина в качестве кандидата в противомикробное средство.....	252
Қамұнұр Қ., Ысқақ М., Мұсапирова Л. Влияние химической модификации лигносульфоната натрия на его флотационные свойства в системе барит–кальцит.....	264
Кононов А., Қамұнұр Қ., Мұсапирова Л., Асылханова Д., Батқал А. Получение и исследование неорганического флокулянта Al–Fe–Mn на основе модифицированного бентонита.....	276
Курмангалиева А., Ахметова Ф., Карешова Ж., Исаков Р. ПДМА-модифицированный таганский бентонит для получения водорода при каталитической конверсии углеводородов.....	292
Қуртебаева А.А., Álvarez-Torrellas S., Noor Haida Mohd Kaus., Gomes Н.Т., Калмаханова М.С. Модифицированные железом активированные угли из кукурузных початков для адсорбционно-окислительного удаления парацетамола и сульфаметоксазола.....	307
Надиров Р.К., Нуртазина Н.Д., Рыскалиева Р.Г. Моделирование поверхности отклика и оптимизация флотации ильменита с использованием модифицированного лигносульфонатного реагента.....	334
Нефедов А.Н., Тайкенова А.Т., Имашев Б.К., Нурисламов Р.М., Леонтьева К.А. Квантовые вычисления в моделировании коррозионных процессов.....	350
Нуркенов О.А., Фазылов С.Д., Сыздыков А.К., Кабиева С.К., Жаслан Р.К. Синтез и структурное исследование сульфопроизводных 3,5-диметилизоксазола совторичными аминами.....	365
Оразбекова Р.С., Тунгатарова С.А., Байжұманова Т.С., Кауменова Г.Б., Жұмабек М. Влияние состава реакционной смеси в паровом риформинге биоэтанола на высокоэнтропийном оксидном катализаторе.....	382
Рыскалиева Р.Г., Бейсембаева Л.К., Осеров Т.Б. Гидроциклонная классификация хвостов обогащения Балхашской обогажительной фабрики.....	398
Сасс А.С., Торлопов И.И., Рахметова К.С., Кензин Э.Н., Журинов М. Формирование и созревание фосфатных покрытий на стали из фосфатирующего раствора на основе спирта.....	418

Сдикова Г.Ж., Далабаева Н.С., Балкембай А.С., Сарова Н.Б., Жалтырбаева Н.К. Влияние состава электролита на свойства гальванических покрытий на основе цинка.....	435
Сейткалиева Н., Кусаинова Г., Журсумбаева М., Мохамад Ибрагим М.Н., Абдиев К. Исследование флокулирующих свойств сополимеров на основе итаконовой кислоты.....	448
Сергазина С.М., Нурмуханбетова Н.Н., Острцова Н.Б., Камзе А.Р., Касенова Н.Б. Комплексная оценка качества природной питьевой воды и статистический анализ физико-химических показателей.....	460
Талгаткызы А., Нажибкизы М., Отенов А., Сейтказинова А., Исанбекова А. Углеродные волокна на основе органосольв лигнина, полученного из древесных отходов, для применения в системах хранения энергии.....	475
Токтабаева А.К., Махаева Д.Н., Рахметуллаева Р.К., Рвайдарова Г.О., Исенова Г.Д. Синтез, структура и физико-химические свойства серосодержащих композитов на основе анилина, п-фенилендиамина, фенола и формальдегида.....	498
Ешманова Г.Б., Смагулов Д.У. Влияние частиц на основе кремния на формирование и состав ПЭО покрытий.....	517
Жортарова А.А., Kubicek V., Ибраев М.К., Панышина С.Ю., Сейдахметова Р.Б. N-фосфорилирование аминотиазолов и амино-тиадиазолов с помощью реагентов Р(III) и Р(V): синтез, структура и биологическая активность.....	538
Жусупова А., Тюменцева О., Антонюк В. Сравнительное исследование кинетики и энергетики планетарного измельчения отвального медеплавильного шлака и гранулированного шлака свинцовой плавки.....	553

ACADEMIC JOURNAL
OF PHYSICAL AND CHEMICAL SCIENCES
ISSN 2224-5227
Volume 3.
Number 359 (2026), 517-537

<https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.490>

UDC: 66.087
IRSTI: 53.49.21

©Yeshmanova G.B.*, Smagulov D.U., 2026.

Satbayev University, Almaty, Kazakhstan.

*E-mail: g.yeshmanovaa@gmail.com

EFFECT OF SILICON-BASED PARTICLES ON THE FORMATION AND COMPOSITION OF PEO COATINGS

Yeshmanova Gaukhar — PhD, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: g.yeshmanovaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8707-8385>;

Smagulov Dauletkhan — Doctor of Technical Sciences, Professor, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

E-mail: d.smagulov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0599-8741>.

Abstract. The present study investigated the influence of different silicon-containing particles (SiO_2 and Si_3N_4) introduced into a phosphate-based electrolyte on the formation of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings and the efficiency of silicon incorporation into their composition. The use of different silicon sources enables the formation of oxide coatings with a modified phase compositions and a combination of functional properties. It was demonstrated that the addition of silicon-containing particles of different types and sizes doesn't contribute to a significant increase in coating thickness or a reduction in surface porosity. It was established that the nature of silicon incorporation in coating formation strongly depends on the chemical nature and size of the particles used, the final oxidation voltage attained, and the locally high temperatures generated during electrical discharges. The most effective silicon source for the formation of silicon-containing phases was the introduction of SiO_2 nanoparticles into the electrolyte, which ensured their intensive uptake and reactive incorporation into the growing coating, resulting in the formation of mixed mullite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$) phases alongside $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ at a final voltage of 495 V. In contrast, when micro-sized SiO_2 particles and Si_3N_4 nanoparticles were used, the local discharge temperature during PEO at a final voltage of 485 V was insufficient for the formation of silicate phases, which was attributed to the larger size of the SiO_2 particles and the high chemical stability of Si_3N_4 . Furthermore, wear-resistance testing of PEO coatings containing silicon-containing particles demonstrated a high load-bearing capacity of the coatings formed using SiO_2 nanoparticles, which withstood a load of 10 N over a sliding distance of 10,000 mm.

Keywords: Plasma electrolytic oxidation (PEO), AA2024 alloy, SiO_2 and Si_3N_4 nanoparticles, mullite

Funding: *This research was supported by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the project Zhas Galym IRN AP25795409, “Study on surface modification of aluminum alloys by plasma electrolytic oxidation”.*

For citations: *Yeshmanova G.B., Smagulov D.U. Effect of Silicon-Based Particles on the Formation and Composition of PEO Coatings. Academic Journal of Physical and Chemical Sciences. 2026. No.3. Pp. 517-537. DOI: <https://doi.org/10.32014/2026.2518-1483.490>*

©Ешманова Г.Б. *, Смагулов Д.У., 2026.

Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан.

*E-mail: g.yeshmanovaa@gmail.com

КРЕМНИЙ НЕГІЗІНДЕГІ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ПЭО ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫ МЕН ҚҰРАМЫНА ӘСЕРІ

Ешманова Гауһар — PhD, Сәтбаев университеті, Алматы, Қазақстан,
E-mail: g.yeshmanovaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8707-8385>;

Смагулов Даулетхан — техника ғылымдарының докторы, профессор, Сәтбаев университеті,
Алматы, Қазақстан,
E-mail: d.smagulov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0599-8741>.

Аннотация. Осы зерттеуде фосфатты электролитке енгізілетін әртүрлі кремний құрамды бөлшектердің (SiO_2 және Si_3N_4) ПЭО жабындыларының қалыптасу үрдістеріне және кремнийдің олардың құрамына қосылу тиімділігіне әсері зерттелді. Кремнийдің әртүрлі көздерін пайдалану фазалық құрамы модификацияланған және функционалдық сипаттамаларының жиынтығына ие оксидтік жабындыларды қалыптастыруға мүмкіндік береді. Әртүрлі өлшемді кремний құрамды бөлшектердің қолдану жабындылардың қалыңдығының айтарлықтай артуына немесе беткі қабаттың кеуектілігінің төмендеуіне әкелмейтіні көрсетілді. Кремнийдің жабындылардың қалыптасуына қатысу сипаты пайдаланылатын бөлшектердің химиялық табиғаты мен өлшеміне, қол жеткізілген соңғы оксидтеу кернеуіне, сондай-ақ разрядтар аймағында жергілікті жоғары температураларға елеулі дәрежеде тәуелді екені анықталды. Кремний құрамды фазаларды қалыптастыру үшін кремнийдің ең тиімді көзі электролитке SiO_2 нано бөлшектерін енгізу болып табылады. Бұл олардың қарқынды сіңірілуін және қаптамаға реакциялық жолмен қосылуын қамтамасыз етіп, 495 В соңғы кернеуде $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ фазасымен қатар муллиттің ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$) аралас фазаларының түзілуіне мүмкіндік береді. Сонымен қатар, микроөлшемді SiO_2 бөлшектері мен Si_3N_4 нано бөлшектерін қолданған кезде, ПЭО үрдісі барысында 485 В соңғы

кернеуде разрядтардың жергілікті температурасы силикатты фазалардың түзілуі үшін жеткіліксіз болғаны анықталды, бұл SiO_2 бөлшектерінің ірі өлшемімен және Si_3N_4 -тің жоғары химиялық тұрақтылығымен байланысты. Бұдан басқа, кремний құрамды бөлшектер қосылған ПЭО жабындарының тозуға төзімділігін зерттеу нәтижелері SiO_2 нанобөлшектерін пайдаланып қалыптастырылған қаптамалардың жоғары жүктеме көтергіш қабілетке ие екенін көрсетті: олар 10 Н жүктемеге 10 000 мм сырғанау қашықтығында төтеп береді.

Түйін сөздер: плазмалық электролиттік оксидтеу (ПЭО), АА2024 қорытпасы, SiO_2 және Si_3N_4 нано бөлшектері, муллит

©Ешманова Г.Б.*, Смагулов Д.У., 2026.

Сатпаев университет, Алматы, Казахстан.

*E-mail: g.yeshmanovaa@gmail.com

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЦ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ И СОСТАВ ПЭО ПОКРЫТИЙ

Ешманова Гаухар — PhD, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан,

E-mail: g.yeshmanovaa@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8707-8385>;

Смагулов Даулетхан — доктор технических наук, профессор, Сатпаев университет, Алматы, Казахстан,

E-mail: d.smagulov@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-0599-8741>.

Аннотация. В настоящем исследовании изучено влияние различных кремнийсодержащих частиц (SiO_2 и Si_3N_4) вводимых в фосфатный электролит, на процессы формирования ПЭО покрытий и эффективность включения кремния в их состав. Использование различных источников кремния позволяет формировать оксидные покрытия с модифицированным фазовым составом и совокупностью функциональных характеристик. Показано, что добавление кремнийсодержащих частиц различного типа и размера не способствует существенному увеличению толщины покрытий или снижению пористости поверхности. Установлено, что характер участия кремния в формировании покрытий существенно зависит от химической природы и размера используемых частиц, достигнутого конечного напряжения оксидирования и локально высоких температур разрядов. Наиболее эффективным источником кремния для формирования кремнийсодержащих фаз является введение наночастиц SiO_2 в электролит, обеспечивающее их интенсивное поглощение и реактивное включение в покрытие с образованием смешанных фаз муллита ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$) наряду с $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (конечное напряжение 495 В). В то же время при использовании микроразмерных частиц SiO_2 и наночастиц Si_3N_4 локальная температура разрядов в процессе ПЭО при конечном напряжении 485 В оказалась недостаточной для образования силикатных фаз, что связано с большим размером частиц SiO_2 и высокой химической стабильностью Si_3N_4 . Кроме того, анализ износостойкости ПЭО покрытий с добавлением кремнийсодержащих частиц показал высокую несущую способность покрытий,

сформированных с использованием наночастиц SiO_2 , которое выдерживает нагрузку 10 Н на расстояние скольжения 10 000 мм.

Ключевые слова: Плазменное электролитное оксидирование (ПЭО), сплав AA2024, наночастицы SiO_2 и Si_3N_4 , муллит

Введение. В настоящее время технология поверхностного упрочнения деталей и формирование защитных покрытий с повышенной механической прочностью и химической стабильностью приобретают особую актуальность (Liu et al., 2020). Повышение требований к эксплуатационной надежности деталей, работающих в условиях интенсивных контактных и трибологических нагрузок, обуславливает необходимость формирования на их поверхности функциональных слоев с заданными свойствами. Достижение требуемых эксплуатационных характеристик может обеспечиваться посредством целенаправленного изменения химического и фазового состава, и структурных параметров поверхностного слоя. Одним из наиболее перспективных и технологически эффективных методов формирования защитных покрытий на деталях из алюминиевых сплавов является метод плазменного электролитного оксидирования (ПЭО). Актуальность и перспективность технологии ПЭО обусловлены возможностью ее применения в качестве альтернативы традиционным методам поверхностной обработки. В отличие от ряда существующих технологических процессов, ПЭО позволяет формировать функциональные оксидные покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками, обеспечивая при этом более эффективное управление структурой и свойствами поверхностного слоя (Shrestha et al., 2010).

Благодаря значительному улучшению трибологических и коррозионных характеристик материалы, обработанные методом ПЭО, находят широкое применение в различных отраслях промышленности (Kaseem et al., 2021). Процесс ПЭО сопровождается стадиями быстрого нагрева и охлаждения, вызванными электрическими разрядами, что приводит к формированию толстых покрытий на основе оксидов. Сформированное оксидное покрытие образует единое соединение с металлической подложкой и характеризуется высокой адгезионной прочностью, что обусловлено его образованием как вследствие окисления материала подложки, так и в результате осаждения компонентов электролита. (Zhang et al., 2023).

В случае алюминиевых подложек основным компонентом ПЭО покрытий является оксид алюминия – важный керамический материал, обладающий высокими электрохимическими и механическими свойствами (Fatimah et al., 2019). Кроме того, наряду с оксидом алюминия в состав ПЭО покрытий могут входить смешанные фазы, такие как муллит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$), содержащий кремний; наличие таких фаз способно дополнительно усилить защиту алюминиевой основы от коррозии и износа (Huang et al., 2020). Кроме того, высокая адгезионная прочность слоя по отношению к подложке, его улучшенные механические характеристики, а также сравнительно низкая теплопроводность покрытий с высоким содержанием муллита обуславливают перспективность их применения

в качестве теплозащитных покрытий (Curran et al., 2007). Наблюдается также высокий рост покрытий на алюминий при использовании силикатных электролитов (Curran et al., 2007b).

Существуют различные способы введения кремнийсодержащих фаз в ПЭО покрытие, например введением в электролит нерастворимых частиц (Polunin et al., 2021; Blawert et al., 2012; Krishtal et al., 2022; Polunin et al., 2020; O'Hara et al., 2020). Добавление частиц в состав электролита оказывает существенное влияние на процессы формирования покрытий, а также на их последующие эксплуатационные характеристики (Polunin et al., 2021). Для обеспечения эффективного включения частиц в структуру покрытия необходимыми условиями являются: (1) высокий отрицательный поверхностный заряд частиц в условиях постоянного тока; (2) относительно низкая температура плавления ($<1200\text{ }^{\circ}\text{C}$); (3) высокая энергия разрядов в процессе ПЭО (Blawert et al., 2012). Интенсивность реакции возрастает также в случае, когда смешанная фаза характеризуется более низкой температурой плавления по сравнению с исходными фазами. При этом увеличение размера частиц приводит к возрастанию времени, необходимого для достижения температуры их полного плавления и последующего формирования требуемых смешанных фаз. Более того, использование частиц кремния может рассматриваться в качестве эффективного способа снижения высокой шероховатости поверхности и уменьшения пористости формируемого слоя, наряду с образованием силикатосодержащих фаз, обеспечивающих дополнительные функциональные свойства получаемого покрытия (Krishtal et al., 2022). При этом поглощение и включение частиц в покрытие могут зависеть от множества факторов. Например, как показано в работе (Lu et al., 2016), наночастицы легче включаются в покрытие, чем частицы микронного размера. Кроме того, низкая температура плавления частиц ($1000\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) может указывать на их реакционное включение в ПЭО слой, тогда как частицы с высокой температурой плавления, такие как SiC ($2730\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Lu et al., 2016) и Si_3N_4 ($1900\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Lu et al., 2013), включались преимущественно инертно, независимо от их размера. Однако, данные частицы способствуют увеличению скорости роста покрытий и однородности оксидного слоя (Polunin et al., 2020). Кроме того, введение частиц в состав покрытия может способствовать снижению удельных энергетических затрат во время процесса ПЭО, поскольку энергетически затратный процесс окисления металлической подложки, обусловленный повторным возникновением высокоэнергетических разрядов, не будет доминирующим на протяжении всего процесса формирования покрытия (O'Hara et al., 2020).

Данное исследование посвящено комплексному изучению влияния кремнийсодержащих частиц различного типа и размера (нано- и микрочастицы SiO_2 , и наночастицы Si_3N_4) на процессы формирования, фазовый состав, структуру и свойства оксидных слоев, получаемых методом ПЭО.

Материалы и методы. В настоящей работе были выбраны прямоугольные образцы из листового проката из алюминиевого сплава AA2024, которое содержит (в мас. %) 4.9 Cu, 1.8 Mg, 0.5 Fe, 0.5 Si, 0.3 Zn, 0.3 Mn и остальное Al. Размеры

образца соответствуют 20 мм × 30 мм × 1.6 мм. Во время ПЭО для обеспечения стабильного прохождения тока через образец и электролит в образцах было выполнено резьбовое отверстие диаметром 2,5 мм, после чего образцы были закреплены на токопроводящем держателе.

Электролиты, использованные в процессе ПЭО, состояли из растворов гидроксида калия (KOH, Geyer GmbH) и тринатрийфосфата (Na_3PO_4 , Alfa Aesar) (таблица 1). Электролит готовили путем растворения исходных компонентов в деионизированной воде при комнатной температуре с последующим перемешиванием на магнитной мешалке до получения однородного раствора. В качестве добавок к электролиту (2 г/л KOH + 24 г/л Na_3PO_4), были выбраны три различных нано- и микроразмерных частиц, а именно, SiO_2 с двумя размерами частиц 1-5 мкм и наночастицами (в среднем 12 нм) (обе от Sigma-Aldrich Chemie GmbH) и Si_3N_4 (Goodfellow) с размером наночастиц 0.02 мкм. Электролит с дисперсными добавками готовили поэтапно. На первом этапе формировали основной фосфатный состав электролита. После полного растворения исходных компонентов в раствор постепенно вводили частицы с последующим перемешиванием на магнитной мешалке (таблица 1).

Таблица 1. Образцы и параметры процесса.

Образцы	Электролит	Добавление частиц	pH	Электропроводность, мСм/см
2K24P	2 г/л KOH + 24 г/л Na_3PO_4	-	12.7	27.7
нано- SiO_2	2 г/л KOH + 24 г/л Na_3PO_4	2.5 г/л SiO_2 наночастицы	12.4	24.8
микро- SiO_2	2 г/л KOH + 24 г/л Na_3PO_4	2.5 г/л SiO_2 микрочастицы	12.8	27.9
нано- Si_3N_4	2 г/л KOH + 24 г/л Na_3PO_4	2.5 г/л Si_3N_4 наночастицы	12.7	26.7

Процесс ПЭО осуществляли с использованием лабораторного импульсного источника постоянного тока. Оксидирование проводили в ПВХ емкости, оснащенной катодом, выполненным в виде трубки из нержавеющей стали, с площадью поверхности около 5 дм². Катод был объединен с системой охлаждения, обеспечивающей поддержание заданного температурного режима электролита. В качестве анода использовали исследуемые образцы, соединенные с токопроводящим держателем. Экспериментальные исследования проводили при различных концентрациях компонентов смешанного щелочного электролита. В процессе ПЭО температура электролита поддерживалась на постоянном уровне 20 ± 1 °C посредством системы водяного охлаждения. Были установлены плотность тока 100 мА/см² и ограничение напряжения 500 В. Выбраны рабочий цикл 10 % (соотношение длительности импульса и паузы $t_{\text{on}}:t_{\text{off}} = 1 \text{ мс} : 9 \text{ мс}$) и время обработки 600 с. После завершения обработки образцы промывали деионизированной водой и высушивали на воздухе. При использовании добавок для обеспечения их равномерного распределения в электролите в процессе ПЭО, механическое перемешивание дополнительно комбинировали с установкой для барботирования сжатым воздухом. Применение данной системы способствовало

снижению интенсивности осаждения частиц и поддержанию их равномерной концентрации в электролите.

Характеристика покрытий. При ПЭО изменение напряжения во времени регистрировали с использованием программного пакета системы сбора данных SignaSoft 6000 (Gantner Instruments). Морфология поверхности и поперечного сечения покрытий были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ, TescanVega3SB), оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС, eumeX, IXRF Systems) для оценки элементного состава полученных покрытий. Перед проведением исследований на поверхность образцов наносили тонкий слой углерода (C) или золота (Au), что позволяло минимизировать влияние поверхностных электрических зарядов, возникающих вследствие низкой электропроводности или непроводимости ПЭО покрытий. Дополнительная информация о характеристиках поверхности и результатах элементного картирования покрытий, содержащих частицы, была получена методом двухлучевой сканирующей электронной микроскопии высокого разрешения (СЭМ, Tescan, Lyla 3). Для исследования морфологии поперечного сечения покрытий ПЭО обработанные образцы заливали в эпоксидную смолу. Подготовку поперечных шлифов осуществляли последовательной механической обработкой абразивными листами из SiC с зернистостью 500, 800, 1200 и 2500. На завершающем этапе поверхность шлифов полировали с использованием алмазной пасты с размером зерна 0,5 мкм. Толщину покрытия измеряли толщиномером (MiniTest 2100, ElektroPhysik) и верифицировали путем наблюдения поперечных сечений в СЭМ. Дальнейший анализ морфологии поверхности и оценка шероховатости покрытий проводились с использованием лазерного сканирующего конфокального микроскопа (LSM 800, ZEISS). Для определения пористости поверхности, а также количества и диаметра пор в слоях (в пересчете на 1 мм² площади поверхности), использовалось программное обеспечение ImageJ. Фазовый состав ПЭО покрытий изучали методом рентгенофазового анализа (РФА, D8 Advance, BrukerAXS) с использованием источника излучения Cu K α (напряжение 40 кВ, ток 40 мА) и скорости сканирования 0.02 °/с в диапазоне углов 2 θ от 20° до 80° при угле скольжения 3°.

Износостойкость ПЭО покрытий оценивали в условиях сухого трения скольжения с использованием трибометра производства TRIBOtechnic с возвратно-колебательным движением. В качестве контртела применяли стальной шарик из стали AISI 52100 диаметром 6 мм. Испытания проводили при температуре окружающей среды 25 $\pm$ 2 °C и относительной влажности воздуха 30 %. Для проведения трибологических испытаний устанавливали следующие параметры: нормальная нагрузка 9 и 10 Н, амплитуда возвратно-колебательного движения 10 мм, скорость скольжения 5 мм/с и длина пути трения 10 м. Каждое испытание выполняли в трех повторениях с целью оценки воспроизводимости и достоверности полученных результатов.

Результаты. Фазовый состав исходных частиц перед их введением в электролит исследовали методом рентгенофазового анализа (рис. 1). Установлено,

что наночастицы SiO_2 характеризуются преимущественно аморфным состоянием, тогда как частицы SiO_2 микронного размера представляют собой кристаллическую фазу $\alpha\text{-SiO}_2$ (ICDD 01-077-1060). Фазовый состав наночастиц Si_3N_4 , в свою очередь, представлен кристаллическими фазами SiO_2 (ICDD 01-082-1571) и Si_3N_4 (ICDD 01-072-7653), вместе с аморфной составляющей.

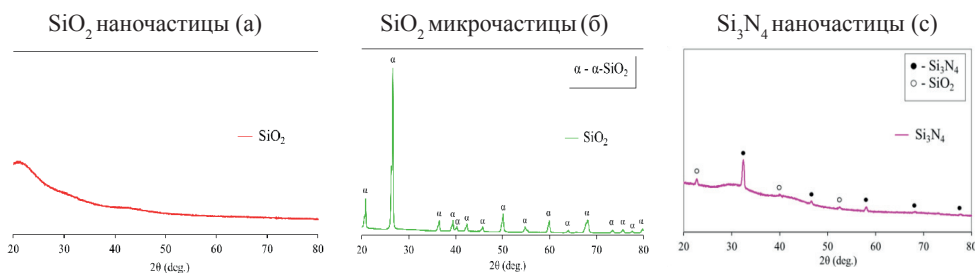


Рисунок 1. Рентгенограммы частиц кремния: а) SiO_2 (наночастицы), б) SiO_2 (микроразмерные частицы) и в) Si_3N_4 (наночастицы).

Фазовый состав покрытий

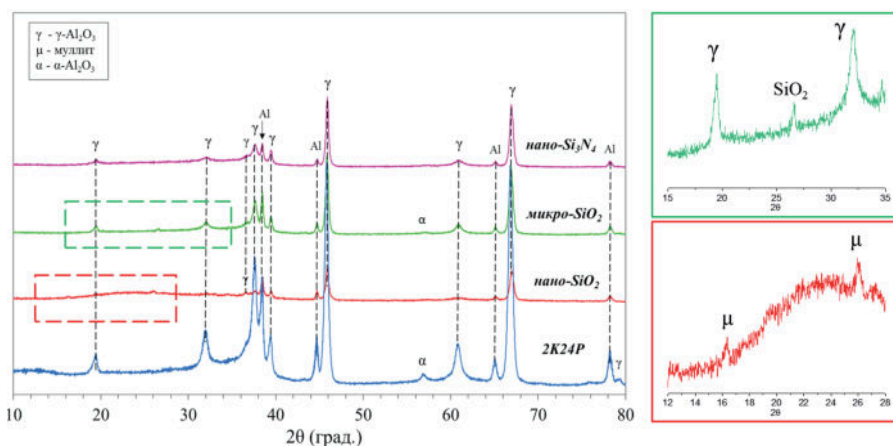


Рисунок 2. Рентгенограммы различных покрытий ПЭО.

На рис. 2 представлены результаты рентгеноструктурного анализа ПЭО покрытий, полученных с использованием различных частиц в составе электролита. Установлено, что основной кристаллической фазой, присутствующей во всех исследуемых покрытиях, является $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (ICDD 00-010-0425). В покрытии 2K24P, сформированном без добавления частиц, содержание кристаллических фаз $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (ICDD 00-046-1212) составляет 84.1 и 2.1 мас.% соответственно, при этом содержание остаточного Al достигает 13.7 мас.%. В составе покрытия, сформированного с добавлением нано- SiO_2 , выявлено образование

кристаллической фазы муллита в количестве 7.8 мас.%(ICDD 01-075-6077), при содержании $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (77.3 мас.%) и наличии аморфной составляющей. При этом отмечается снижение как количества, так и интенсивности дифракционного пика, соответствующего $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, тогда как дифракционный сигнал $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ не был обнаружен. Вероятно, образование фазы муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) связано с взаимодействием частиц SiO_2 с оксидом алюминия, присутствующим в покрытии. Изменение интенсивности дифракционных пиков $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ может рассматриваться как один из факторов, подтверждающих реакционное включение частиц SiO_2 в структуру покрытия. Для дополнительной оценки изменения фазового состава были рассчитаны нормализованные значения интенсивности дифракционных пиков $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ для покрытий 2K24P и нано- SiO_2 . Установлено, что для покрытий нано- SiO_2 интенсивность $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ снижается с 0.97 до 0.90 по сравнению с исходным покрытием 2K24P, одновременно с появлением новых дифракционных пиков, соответствующих мулиту (вставка на рис. 2).

Вместе с тем введение более крупных частиц микро- SiO_2 не привело к существенным изменениям фазового состава покрытия. Основной кристаллической фазой в данном случае также остается $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, содержание которой составляет 87.9 мас.%. Дополнительно выявлен единичный дифракционный пик низкой интенсивности, соответствующий SiO_2 в количестве 1.0 мас.%(ICDD 01-075-3165). Его наличие может свидетельствовать о частичном реакционном включении микрочастиц SiO_2 в ПЭО покрытие. Для покрытия, полученного с использованием нано- Si_3N_4 , образования силикатосодержащих фаз также не выявлено. В данном случае доминирующей фазой является $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, содержание которой составляет 83.8 мас.%.

В таблице 2 представлены соответствующие параметры кристаллической решетки и размеры кристаллитов относительно $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Параметры кристаллической решетки исследуемых образцов определяли с использованием программного обеспечения RTP, обеспечивающего высокую точность расчетов. Размер кристаллитов рассчитывали по формуле Шеррера с учетом ширины дифракционных пиков. Для образца нано- SiO_2 значение параметра кристаллической решетки составило $7.8841 \text{ \AA}$ (± 0.003), что несколько ниже значений, полученных для остальных исследуемых образцов. Данное изменение может быть обусловлено наличием в покрытии аморфной составляющей наряду с кристаллической фазой, что вследствие структурной неоднородности может приводить к изменению параметров кристаллической решетки. Другим возможным фактором является формирование новых фаз муллита в структуре покрытия, наличие и соотношение которых способны оказывать влияние на параметры кристаллической решетки в зависимости от фазового состава. Кроме того, покрытие нано- SiO_2 характеризуется максимальным размером кристаллитов, достигающим 24.5 нм. Введение кремнийсодержащей составляющей может способствовать увеличению размеров кристаллитов вследствие ее влияния на термодинамические и кинетические процессы кристаллизации. В частности, присутствие кремния способно снижать скорость образования новых центров

кристаллизации, создавая условия для преимущественного роста уже сформировавшихся кристаллитов.

Таблица 2. Характеристики кристаллической решетки образцов (относительно $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$).

Образцы	Параметр решетки а, Å	Размер кристаллитов L, нм	Параметр решетки а, Å согласно JCPDS
2K24P	7.9103 ± 0.003	17.7	7.906 (№ 74-2206)
нано-SiO ₂	7.8841 ± 0.003	24.5	-
микро-SiO ₂	7.9008 ± 0.002	20.7	-
нано-Si ₃ N ₄	7.9004 ± 0.003	20.2	-

Морфология поверхности и элементный анализ

Морфология поверхности исследуемых покрытий показана на рис. 3. Для всех исследуемых образцов характерна кратерообразная морфология поверхности. В случае покрытия, сформированного с добавлением нано-SiO₂ (рис. 3б), вблизи открытых пор наблюдаются отдельные выступы, образование которых, вероятно, связано с формированием расплавленной фазы покрытия, содержащей кремнийсодержащие компоненты, и ее выбросом в результате воздействия плазменных разрядов. Параметры пористости исследуемых покрытий представлены в табл. 3.

Проведение ПЭО в фосфатном электролите без введения добавок (образец 2K24P) обеспечило формирование покрытий с относительно однородной поверхностью и шероховатостью 1.0 ± 0.2 мкм (рис. 3а). Средний размер пор составил 5.4 ± 0.5 мкм, при этом их количество достигало 7160 ± 800 . Согласно данным, представленным в табл. 3, введение дисперсных частиц в состав электролита способствует снижению поверхностной пористости до 3.6 - 4.1 % по сравнению с исходным покрытием 2K24P, для которого данный показатель составляет около 5.0 %. Добавление наночастиц SiO₂ в электролит способствовало формированию покрытий с пониженной поверхностной пористостью, составляющей 3.6 ± 0.1 %, а также минимальным количеством пор – 3468 ± 240 . Вместе с тем для данного покрытия зафиксировано существенное увеличение среднего размера пор по сравнению с покрытием 2K24P, до 8.0 ± 0.4 мкм. Полученный результат может быть обусловлен возникновением высокоэнергетических плазменных разрядов при достижении высоких конечных значений напряжения, составляющих 495 В. Наличие выраженных выступов на поверхности покрытия, сформированного в электролите с добавлением нано-SiO₂, может свидетельствовать о многократном выбросе и последующем осаждении расплавленного материала, содержащего наночастицы SiO₂, через каналы плазменных разрядов. Данное наблюдение согласуется с результатами ранее проведенных исследований, в которых показано, что присутствие кремнийсодержащих частиц способно приводить к формированию покрытий с неоднородной толщиной.

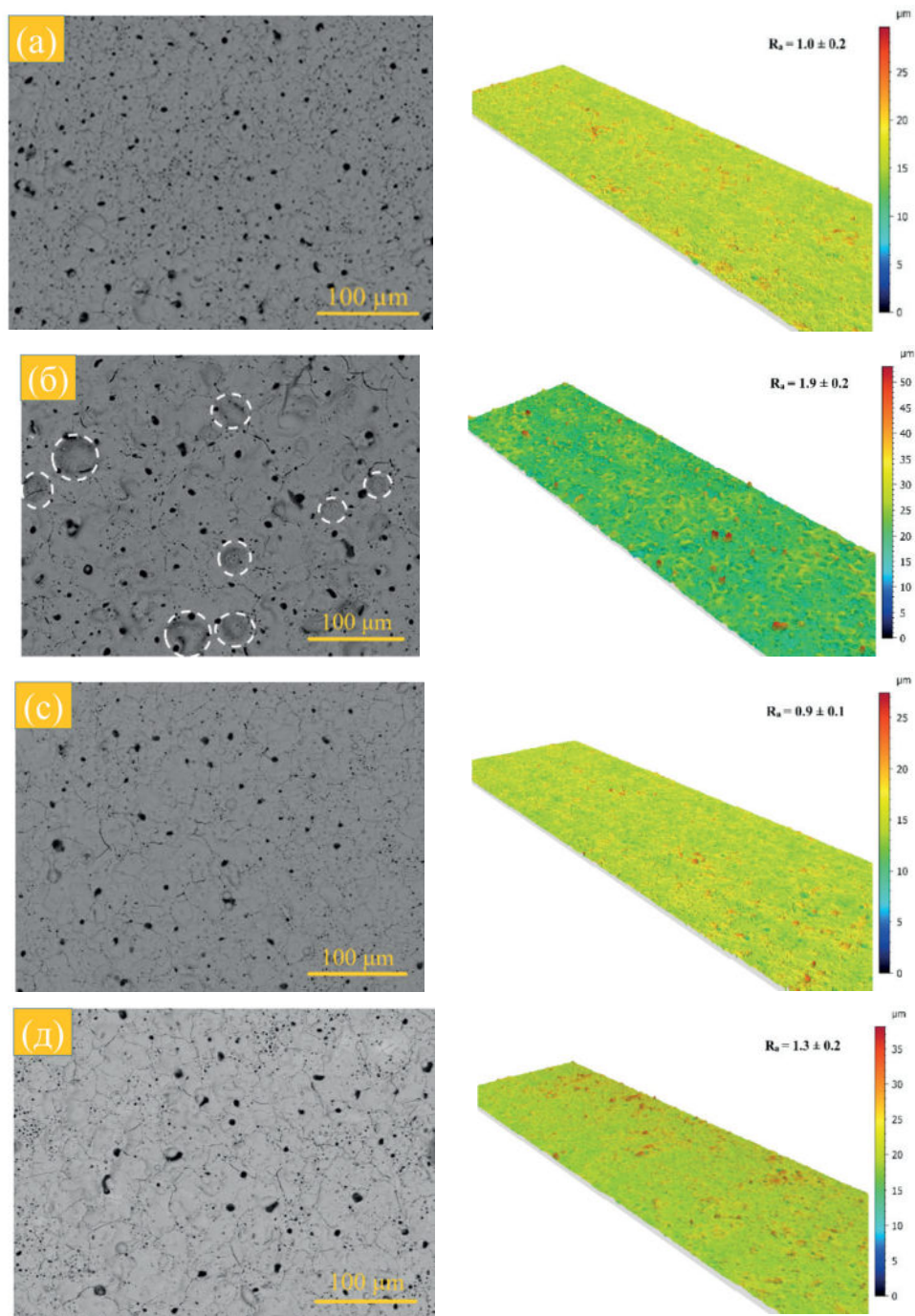


Рисунок 3. Морфология поверхности и шероховатость покрытий ПЗО: а) 2K24P, б) nano-SiO₂, в) микро-SiO₂, д) nano-Si₃N₄. Характерные выступы на поверхности отмечены пунктирными кругами.

В отличие от покрытия, полученного с использованием наноразмерного SiO_2 , ПЭО покрытие, сформированное в электролите с добавлением микрочастиц SiO_2 (рис. 3с), характеризовалось минимальной шероховатостью поверхности, составляющей 0.9 ± 0.1 мкм, а также наименьшим средним размером пор около 4.2 ± 0.3 мкм. Морфологический анализ поверхности образца с микро- SiO_2 показал количество пор, сопоставимое с соответствующим показателем для покрытия 2K24P: 7420 ± 1600 и 7160 ± 800 соответственно. Введение наночастиц Si_3N_4 в состав электролита (рис. 3д) также оказало положительное влияние на характеристики поверхности покрытия. При этом была получена более низкая поверхностная пористость, составляющая 3.7 ± 0.5 %, уменьшенное количество пор около 5544 ± 880 , а также относительно небольшой средний размер пор 5.2 ± 0.1 мкм. Шероховатость поверхности покрытия составила 1.3 ± 0.2 мкм, что в совокупности свидетельствует об улучшении морфологических характеристик по сравнению с исходным покрытием 2K24P.

Таблица 3. Средние характеристики пористости поверхности покрытий.

Образцы	Поверхностная пористость, %	Размер пор, мкм (в диаметре)	Количество пор (для 1 мм ²)
2K24P	5.0 ± 0.6	5.4 ± 0.5	7160 ± 800
нано- SiO_2	3.6 ± 0.1	8.0 ± 0.4	3468 ± 240
микро- SiO_2	4.1 ± 0.1	4.2 ± 0.3	7420 ± 1600
нано- Si_3N_4	3.7 ± 0.5	5.2 ± 0.1	5544 ± 880

Результаты ЭДС-анализа поверхности всех сформированных покрытий представлены в табл. 4. При сравнении влияния введения частиц в состав электролита установлено, что максимальное содержание кремния в покрытии наблюдается для образца, полученного с добавлением нано- SiO_2 , и составляет около 11.6 ± 0.1 ат.%. В покрытиях, сформированных с использованием микро- SiO_2 и нано- Si_3N_4 , содержание кремния значительно ниже и составляет 0.9 ± 0.05 и 2.2 ± 0.1 ат.% соответственно. Следует отметить, что присутствие кремнийсодержащих частиц в составе электролита также способствует увеличению содержания фосфора в покрытиях. Так, для всех трех исследуемых покрытий зафиксировано повышенное содержание фосфора, максимальное значение которого достигает 3.0 ± 0.3 ат.% для покрытия с добавлением нано- SiO_2 , тогда как в исходном образце 2K24P содержание P составляет 0.5 ат.%.

Таблица 4. Элементный анализ поверхности образцов с покрытием, ат.%.

Образцы/ Элементный состав	O	Al	Si	P	K	Na	N
2K24P	43.0 ± 0.5	55.7 ± 0.2	-	0.5 ± 0.2	0.1 ± 0.01	0.8 ± 0.02	-
нано- SiO_2	56.9 ± 0.3	26.9 ± 0.8	11.6 ± 0.1	3.0 ± 0.3	0.3 ± 0.02	1.1 ± 0.02	-
микро- SiO_2	54.7 ± 0.1	42.7 ± 0.05	0.9 ± 0.05	1.1 ± 0.02	0.1 ± 0.01	0.4 ± 0.03	-
нано- Si_3N_4	53.3 ± 0.1	39.6 ± 0.05	2.2 ± 0.1	1.1 ± 0.03	0.1 ± 0.02	0.6 ± 0.01	2.7 ± 0.1

На рис. 4 показано распределение основных элементов на поверхности образцов с частицами. Полученные результаты свидетельствуют о выраженных различиях в характере включения и распределения дисперсных частиц в структуре покрытий в зависимости от их размера (нано- и микро-размерных). Размер частиц оказывает существенное влияние на механизм их переноса, захвата и последующего внедрения в формируемый оксидный слой. Предположительно, наночастицы SiO_2 включаются в покрытие преимущественно за счет процессов плавления и последующего спекания на поверхности, тогда как микрочастицы SiO_2 и наночастицы Si_3N_4 преимущественно осаждаются на поверхности формируемого покрытия.

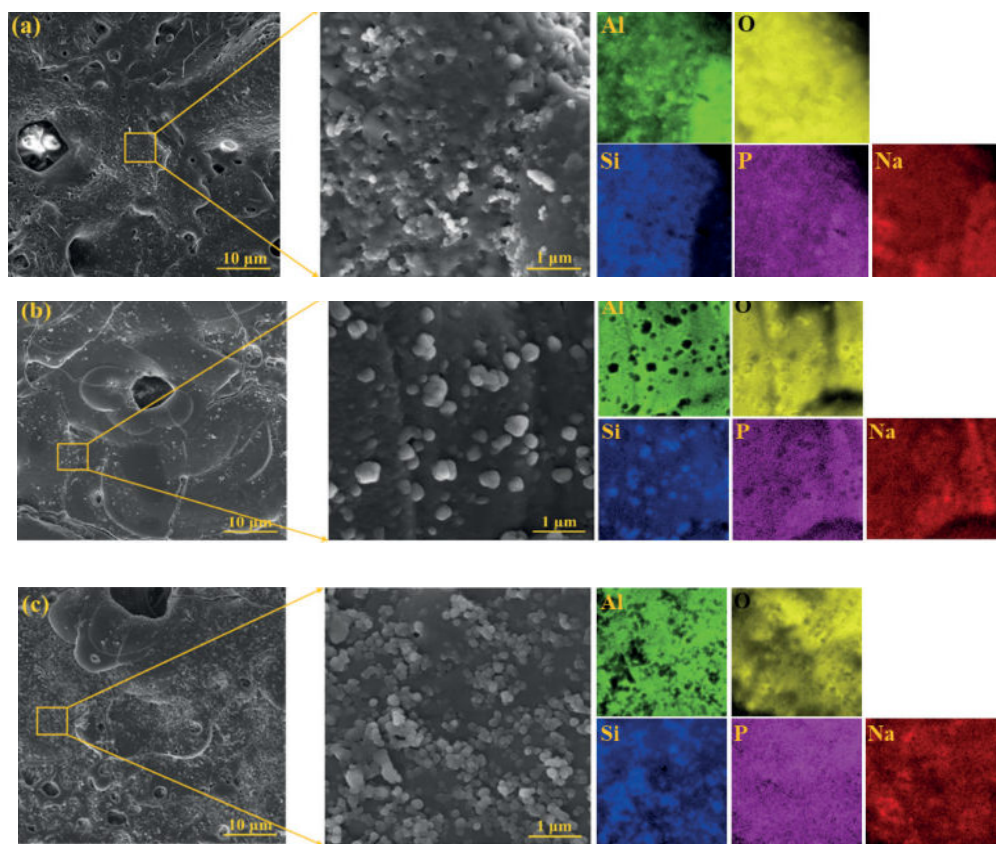


Рисунок 4. ЭДС элементное картирование поверхности покрытий: а) нано- SiO_2 , б) микро- SiO_2 , в) нано- Si_3N_4 .

Наноразмерные частицы SiO_2 и Si_3N_4 характеризуются более равномерным и концентрированным распределением по поверхности покрытий, что подтверждается результатами СЭМ-анализа (рис. 4а, в). Вероятно, вследствие малого размера наночастицы обладают большей способностью к проникновению в структуру покрытия, преимущественно через открытые поры и поверхностные

трещины. В случае образца, сформированного с использованием микрочастиц SiO_2 (рис. 4б), распределение частиц характеризуется меньшей однородностью. На соответствующих СЭМ-изображениях наблюдаются преимущественно отдельные области локализации частиц, что свидетельствует о менее равномерном их включении в структуру покрытия.

Морфология поперечного сечения и распределение элементов.

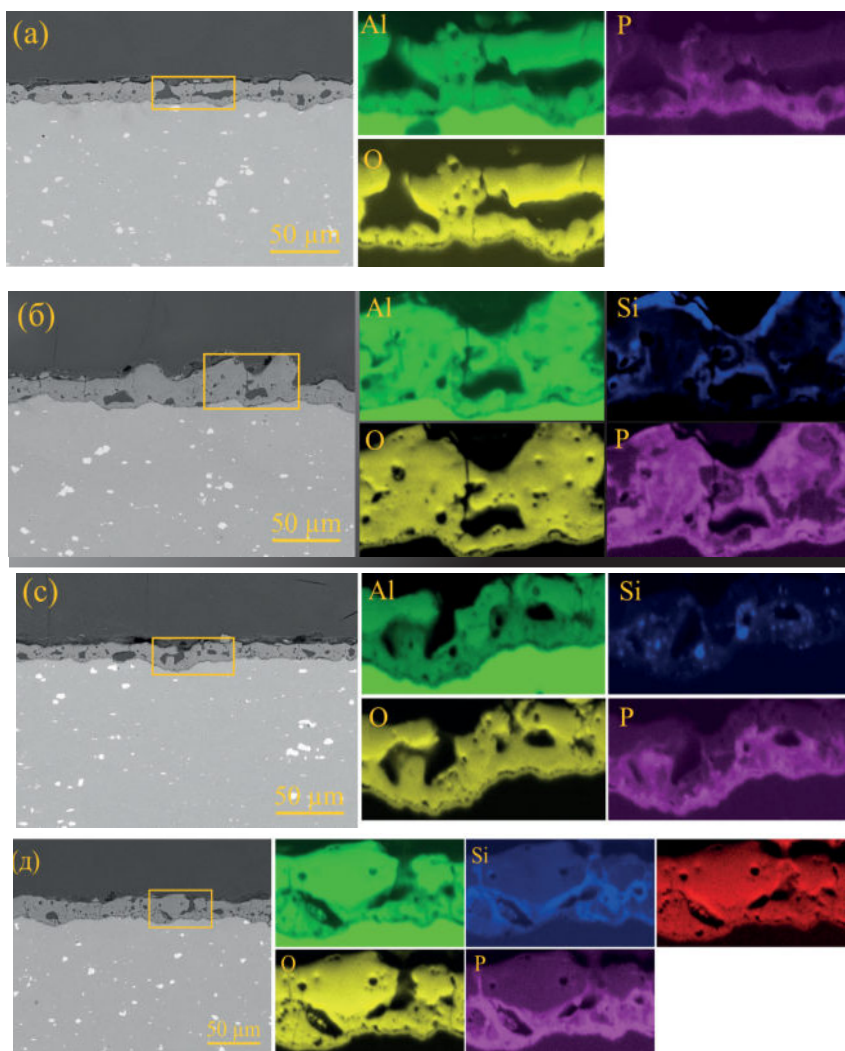


Рисунок 5. Морфология поперечного сечения и распределение элементов в покрытиях ПЭО: а) 2K24P, б) nano-SiO_2 , в) micro-SiO_2 , д) $\text{nano-Si}_3\text{N}_4$.

Морфология поперечного сечения и соответствующие результаты элементного анализа сформированных покрытий представлены на рис. 5. Для исследуемых покрытий характерны неоднородность толщины и развитая пористая структура.

Для исходного образца 2K24P установлена толщина покрытия около 16 ± 1.5 мкм. Анализ поперечного сечения также выявил наличие крупных пор в структуре покрытия 2K24P (рис. 5а). Введение добавок в состав электролита оказывает относительно незначительное влияние на толщину ПЭО покрытий по сравнению с образцом 2K24P. Так, для покрытий нано-SiO₂, микро-SiO₂ и нано-Si₃N₄ толщина составила 19 ± 3 мкм (рис. 5б), 16 ± 3 мкм (рис. 5с) и 18 ± 1.5 мкм (рис. 5д) соответственно. Вместе с тем, по сравнению с покрытием 2K24P, все исследуемые покрытия характеризовались более однородной и плотной структурой.

Таблица 5. Элементный анализ по поперечному сечению образцов с покрытием, в ат. %.

Образцы/ Элементный состав	Положение областей	O	Al	Si	P	N
2K24P	Ближе к поверхности	36.9 ± 0.1	61.3 ± 0.5	-	0.4 ± 0.1	-
	Середина	42.3 ± 4	44.1 ± 6	-	0.9 ± 0.1	-
	Ближе к подложке	38.2 ± 3	57.1 ± 3.3	-	3.8 ± 0.5	-
нано-SiO ₂	Ближе к поверхности	49.5 ± 1.2	40.4 ± 0.9	6.4 ± 0.2	3.3 ± 0.1	-
	Середина	51.4 ± 1	38.1 ± 1.4	6.0 ± 0.1	3.8 ± 0.2	-
	Ближе к подложке	51.3 ± 0.4	38.8 ± 1.5	5.9 ± 0.3	3.6 ± 0.7	-
микро-SiO ₂	Ближе к поверхности	37.3 ± 1	59.3 ± 1	0.7 ± 0.2	1.9 ± 0.1	-
	Середина	44.6 ± 1.2	52.6 ± 1.1	0.8 ± 0.3	1.4 ± 0.2	-
	Ближе к подложке	46.6 ± 2.5	46.6 ± 2.7	1.9 ± 0.7	4.4 ± 1.4	-
нано-Si ₃ N ₄	Ближе к поверхности	36.1 ± 2	43.0 ± 3	1.9 ± 0.8	1.6 ± 0.1	16.8 ± 0.3
	Середина	39.3 ± 0.3	38.9 ± 0.9	2.0 ± 0.8	1.5 ± 0.1	16.9 ± 0.4
	Ближе к подложке	39.3 ± 0.3	36.1 ± 0.6	2.4 ± 0.6	4.0 ± 0.5	17.7 ± 0.5

Согласно данным элементного анализа, представленным в табл. 5, и результатам ЭДС-картирования (рис. 5), кислород характеризуется относительно равномерным распределением по толщине покрытий для всех исследуемых образцов. Для покрытия 2K24P (рис. 5а) выявлено увеличение содержания фосфора по направлению от поверхности к металлической подложке с 0.4 ± 0.1 до 3.8 ± 0.5 ат. % Р (табл. 5). В покрытии с добавлением нано-SiO₂ интенсивный сигнал Si преимущественно локализован в верхней части покрытия, а также в областях, прилегающих к порам и трещинам внутри слоя. В то же время сигнал Р характеризуется относительно равномерным распределением по всей толщине покрытия. Для образцов микро-SiO₂ и нано-Si₃N₄ повышенная интенсивность сигнала Si вблизи пор и трещин, вероятно, связана с наличием растворенного кремния в структуре покрытия, поскольку образования новых Si-содержащих фаз ранее не было выявлено. В покрытиях с добавлением микро-SiO₂ и нано-Si₃N₄ содержание Р возрастает по направлению от внешней поверхности покрытия к границе раздела покрытие/подложка. Для образца нано-Si₃N₄ распределение азота характеризуется относительной равномерностью по всей толщине покрытия. Установлена выраженная зависимость характера элементного распределения от размера вводимых частиц. Для покрытий, сформированных с использованием

наночастиц SiO_2 и Si_3N_4 , сигнал Si распределяется более равномерно по толщине слоя (рис. 5б, д). В случае применения микрочастиц SiO_2 , напротив, кремний преимущественно локализуется в отдельных областях, приуроченных к порам и трещинам покрытия (рис. 5с). Полученные результаты свидетельствуют о различиях в механизме включения и распределения нано- и микрочастиц в формируемой структуре ПЭО покрытий.

Исследование износостойкости образцов. Испытания на износ проводили при последовательном увеличении прикладываемой нагрузки с целью определения несущей способности сформированных покрытий. На рис. 6 представлены зависимости коэффициента трения (μ) от пути скольжения при максимальной нагрузке, которую каждое покрытие выдерживало до разрушения (9 Н), а также при нагрузке, сопровождавшейся разрушением покрытия (10 Н). Независимо от величины приложенной нагрузки коэффициент трения (μ) на начальном этапе испытания постепенно возрастает, после чего достигает относительно стабильного значения, соответствующего плато. Как видно из представленных кривых, в начале испытаний коэффициент трения находится на относительно низком уровне 0.3-0.4, после чего достаточно быстро увеличивается до диапазона 0.6-0.7. Данное изменение может быть связано с продолжающимся процессом изнашивания, сопровождающимся увеличением фактической площади контакта между поверхностью покрытия и контртелом. При повышении нагрузки происходит постепенное выравнивание поверхности исследуемого образца, вследствие чего кривая коэффициента трения становится более стабильной и равномерной. Такой характер изменения коэффициента трения может свидетельствовать об отсутствии существенного разрушения покрытия в процессе испытания.

Введение дисперсных частиц в состав электролита не оказывает существенного влияния на значения коэффициента трения, однако заметно изменяет несущую способность сформированных покрытий (рис. 6б). Наибольшей несущей способностью характеризуется покрытие с добавлением нано- SiO_2 , которое сохраняет целостность при нагрузке 10 Н на протяжении полного пути скольжения, составляющего 10 000 мм.

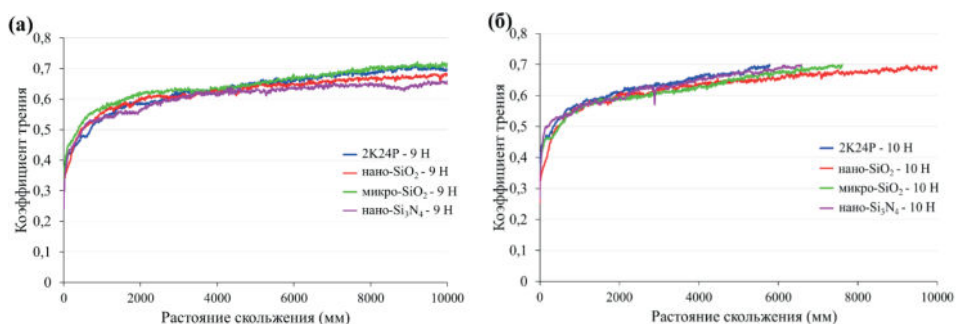


Рисунок 6. Зависимость коэффициента трения от расстояния скольжения для образцов без и с добавлением различных частиц: а) 9 Н и б) 10 Н нагрузке.

Обсуждение. В зависимости от параметров процесса ПЭО включение частиц в формирующееся покрытие может происходить по реактивному, частично реактивному или инертному механизму (Lu et al., 2015). При реактивном механизме частицы расплавляются и в различной степени взаимодействуют с компонентами покрытия с образованием новых фаз. При частично реактивном механизме взаимодействие частиц с материалом покрытия происходит лишь частично, тогда как при инертном включении частицы внедряются в покрытие без существенного химического превращения и образования новых фаз.

Для эффективного включения дисперсных частиц в ПЭО покрытие необходимо выполнение ряда условий: (1) наличие высокого отрицательного поверхностного заряда частиц при использовании источника постоянного тока; (2) относительно низкая температура плавления частиц (менее 1200 °C); (3) высокая энергетическая интенсивность микродуговых разрядов в процессе ПЭО (Fattah-alhosseini et al., 2020).

Дополнительным условием является возможность взаимодействия образующихся фаз с последующим формированием смешанных фаз. Например, более низкая энергия ионизации Al_2O_3 (10,5 эВ) по сравнению с SiO_2 (11,43 эВ) способствует протеканию реакций между данными компонентами. Интенсивность взаимодействия также возрастает в случае, если температура плавления образующейся смешанной фазы ниже температур плавления исходных компонентов.

Установлено, что добавление наночастиц SiO_2 в электролит приводит к их реактивному включению в состав ПЭО покрытий (рис. 2), тогда как микрочастицы SiO_2 внедряются преимущественно по частично реакционному механизму. В свою очередь, наночастицы Si_3N_4 характеризуются преимущественно инертным включением в покрытие.

Основным фактором, определяющим включение частиц в ПЭО покрытие, является электрофоретическая сила, обеспечивающая их перемещение к анодной поверхности под действием электрического поля (Fattah-alhosseini et al., 2020). Все три типа частиц обладают отрицательным поверхностным зарядом. Однако различия в их размере и массе при относительно близких значениях конечного напряжения приводят к различной эффективности их переноса и включения в покрытие. В частности, вследствие меньшей подвижности более крупных и тяжелых частиц микро- SiO_2 и нано- Si_3N_4 их поступление к поверхности анода происходит менее эффективно по сравнению с наночастицами SiO_2 . Наночастицы SiO_2 обладают более высокой подвижностью благодаря значительно меньшему размеру, что способствует их равномерному распределению в электролите и более эффективному включению в покрытие. Благодаря малому размеру они легче достигают поверхности образца, проникают в поры покрытия и попадают в области микродуговых разрядов, где под воздействием локальных высоких температур могут расплавляться и взаимодействовать с компонентами покрытия. Из-за ограничений, связанных с размером частиц, включение микро- SiO_2 в покрытие происходит позднее по сравнению с наночастицами SiO_2 .

Для проникновения более крупных частиц по каналам покрытия необходимы достаточно крупные открытые поры, которые формируются на более поздних стадиях процесса при усилении микродуговых разрядов. Это замедляет включение микроразмерных частиц в покрытие вследствие недостаточной степени их спекания и ограниченного захвата расплавом в течение процесса.

Таким образом, включение частиц различного размера в ПЭО покрытие определяется несколькими факторами, включая электрофоретический перенос частиц, их физическое смешение с материалом покрытия, а также механическое вовлечение частиц расплавленным материалом в зоне микродуговых разрядов.

При добавлении аморфного порошка SiO_2 фазовый состав покрытия также претерпевает существенные изменения. В исходном покрытии 2K24P основная фаза характеризуется полностью кристаллической структурой, тогда как в покрытии, сформированном с добавлением нано- SiO_2 , наблюдается сочетание кристаллической и аморфной фаз с образованием новой фазы муллита. Термические и кинетические условия при различных уровнях разрядного напряжения оказывают существенное влияние на фазообразование в составе покрытия ПЭО. Повышение конечного напряжения сопровождается увеличением энергии микродуговых разрядов и локальной температуры в зоне их воздействия, что, в свою очередь, изменяет условия протекания реакций, спекания и кристаллизации в формирующемся покрытии. По мере увеличения конечного напряжения до 480 В и выше локальные температуры разряда значительно возрастают, достигая значений, превышающих температуру плавления высокотемпературных фаз. Эти высокоэнергетические разряды создают условия для образования кристаллических фаз, таких как $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ и муллит. Оценка локальных температур разряда показывает, что при конечном напряжении выше 480 В температура на поверхности покрытия может достигать до 2000 °С. Эти высокие температуры превышают точки плавления фаз, включая $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (~2050 °С) и муллит (~1830 °С), что создает условия для термической кристаллизации. Это способствует фазовым переходам от процессов твердофазного спекания к более быстрому жидкофазному спеканию в сочетании с реактивным спеканием и образованием кристаллических структур в покрытиях ПЭО.

При добавлении частиц SiO_2 и Si_3N_4 наблюдаются принципиально различные механизмы их включения в покрытие и формирования фаз при относительно близких значениях конечного напряжения. Наночастицы Si_3N_4 характеризуются более низкой реакционной способностью в условиях ПЭО, что обуславливает их преимущественно инертное включение в покрытие без существенного взаимодействия с материалом подложки и компонентами электролита. Несмотря на относительно высокую температуру плавления Si_3N_4 (~1900 °С) по сравнению с SiO_2 (~2000 °С), именно этот фактор не является определяющим для инертного характера их включения. Вероятнее всего, инертность связана с высокой химической стабильностью частиц Si_3N_4 . Используемые электрические параметры процесса при конечном напряжении 485 В, по-видимому, не

обеспечивают достаточной энергии микродуговых разрядов для разрушения прочных ковалентных связей Si-N и последующего протекания интенсивных химических реакций, обеспечивающих вовлечение кремния в образование новых фаз.

Для наночастиц SiO₂ при конечном напряжении около 495 В наблюдалось реактивное включение кремния с образованием новой фазы – муллита (Al₂O₃·nSiO₂), присутствующего совместно с γ-Al₂O₃. Повышение конечного напряжения сопровождалось не только увеличением энергии разрядов, но и созданием более благоприятных условий для разрушения, активации и взаимодействия частиц SiO₂ с материалом подложки по сравнению с использованием частиц Si₃N₄. Наночастицы SiO₂, характеризующееся высокой удельной поверхностью и высокой реакционной способностью, дополнительно облегчает его вовлечение в локальные высокотемпературные процессы. В результате кремний становится доступным для взаимодействия с оксидом алюминия и участвует в формировании силикатной фазы. Тогда как использование микроразмерных частиц SiO₂ при конечном напряжении около 485 В наблюдается частично реактивное включение частиц в покрытие. При этом часть кремния вовлекается в процессы формирования покрытия, тогда как значительная его доля, по-видимому, сохраняется в составе исходного SiO₂. Это может быть связано с меньшей удельной поверхностью и, соответственно, более низкой реакционной способностью микрочастиц. Кроме того, при одинаковом характере воздействия микродуговых разрядов степень прогрева и активации более крупных частиц может быть ниже, что ограничивает их растворение, взаимодействие с высокоактивной оксидной фазой, формирующейся в зоне разряда, и последующее образование новых соединений. Увеличение размера частиц также приводит к увеличению времени, необходимого для достижения ими температуры полного плавления и последующее образование смешанных кремнийсодержащих фаз.

Таким образом, различные кремнийсодержащие соединения в составе электролита демонстрируют существенно различное поведение в условиях ПЭО. При этом фазообразование во время процесса определяется совокупным влиянием конечного напряжения, температурных условий разрядов, а также химической природы и размера кремнийсодержащих частиц. Повышение конечного напряжения увеличивает энергетический потенциал микродуговых разрядов и вероятность протекания высокотемпературных реакций, однако образование кристаллических фаз зависит также от продолжительности воздействия, скорости охлаждения и реакционной способности компонентов. Совокупное влияние этих факторов определяет механизм включения кремния и характер его участия в формировании фазового состава и структуры покрытия.

Заключение. Формирование ПЭО покрытий при использовании различных кремнийсодержащих частиц позволяет получать оксидные покрытия с модифицированным фазовым составом и комплексом функциональных характеристик. Установлено, что включение различных кремнийсодержащих

частиц в ПЭО покрытие, а также формирование фаз определяются совокупным влиянием конечного напряжения, температурных условий разрядов, химической природы и размера частиц. Выявлено, что введение кремнийсодержащих частиц различного типа и размера не приводит к существенному увеличению толщины покрытий и снижению поверхностной пористости. Включение наночастиц SiO_2 в фосфатный электролит обеспечивает их интенсивное поглощение и реактивное включение в формирующееся покрытие с образованием смешанных силикатных фаз, в частности муллита ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$), наряду с $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ при конечном напряжении 495 В. В то же время при использовании микрочастиц SiO_2 и наночастиц Si_3N_4 конечное напряжение 485 В и соответствующие локальные температуры плазменных разрядов оказываются недостаточными для формирования силикатных фаз. Это может быть обусловлено относительно крупным размером частиц SiO_2 и высокой химической стабильностью Si_3N_4 , ограничивающими их реакционное взаимодействие в условиях ПЭО. Анализ износостойкости показал, что ПЭО покрытия, сформированные с добавлением наночастиц SiO_2 , обладают высокой несущей способностью и сохраняют эксплуатационную устойчивость при нагрузке 10 Н на расстоянии скольжения 10 м.

References

- Blawert C., Sah S.P., Liang J., Huang Y., Höche D. (2012). Role of sintering and clay particle additions on coating formation during PEO processing of AM50 magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 213. – P. 48-58. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2012.10.013> (in Eng.).
- Curran J.A., Kalkanç H., Magurova Yu., Clyne T.W. (2007). Mullite-rich plasma electrolytic oxide coatings for thermal barrier applications. *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 201(21). – P. 8683-8687. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2006.06.050> (in Eng.).
- Fatimah S., Yang H.W., Kamil M.P., Ko Y.G. (2019). Control of surface plasma discharge considering the crystalline size of Al substrate. *Applied Surface Science*. – Vol. 477. – P. 60-70. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.208> (in Eng.).
- Fattah-alhosseini A., Chaharmahali R., Babaei K. (2020). Effect of particles addition to solution of plasma electrolytic oxidation (PEO) on the properties of PEO coatings formed on magnesium and its alloys: a review. *Journal of Magnesium and Alloys*. – Vol. 8(3). – P. 799-818. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.05.001> (in Eng.).
- Fattah-alhosseini A., Molaei M., Attarzadeh N., Babaei K., Attarzadeh F. (2020). On the enhanced antibacterial activity of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings that incorporate particles: a review. *Ceramics International*. – Vol. 46(13). – P. 20587-20607. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.05.206> (in Eng.).
- Huang Z.-Q., Wang R.-Q., Zhang H., Shen X.-J., Zhang X.-Z., He Y., Huang C., Shen D.-J., Li D.-L. (2020). Effect of nanosized silicon dioxide additive on plasma electrolytic oxidation coatings fabricated on aluminium. *International Journal of Electrochemical Science*. – Vol. 15(11). – P. 11191-11202. <https://doi.org/10.20964/2020.11.24> (in Eng.).
- Kaseem M., Fatimah S., Nashrah N., Ko Y.G. (2021). Recent progress in surface modification of metals coated by plasma electrolytic oxidation: Principle, structure, and performance. *Progress in Materials Science*. – Vol. 117. – P. 100735. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100735> (in Eng.).
- Krishtal M.M., Katsman A.V., Polunin A.V. (2022). Effects of silica nanoparticles addition on formation of oxide layers on Al-Si alloy by plasma electrolytic oxidation: The origin of stishovite under ambient conditions. *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 441. – P. 128556. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128556> (in Eng.).
- Liu W.-Y., Liu Y., Blawert C., Zheludkevich M.-L., Fan C.-L., Talha M., Lin Y.-H. (2020). Microstructure, wear and corrosion performance of plasma electrolytic oxidation coatings formed on

D16T Al alloy. *Rare Metals*. – Vol. 39(12). – P. 1425-1439. <https://doi.org/10.1007/s12598-020-01523-0> (in Eng.).

Lu X., Blawert C., Huang Y., Ovri H., Zheludkevich M.L., Kainer K.U. (2016). Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles. *Electrochimica Acta*. – Vol. 187. – P. 20-33. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.11.033> (in Eng.).

Lu X., Blawert C., Scharnagl N., Kainer K.U. (2013). Influence of incorporating Si₃N₄ particles into the oxide layer produced by plasma electrolytic oxidation on AM50 Mg alloy on coating morphology and corrosion properties. *Journal of Magnesium and Alloys*. – Vol. 1(4). – P. 267-274. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2013.11.001> (in Eng.).

Lu X., Blawert C., Zheludkevich M.L., Kainer K.U. (2015). Insights into plasma electrolytic oxidation treatment with particle addition. *Corrosion Science*. – Vol. 101. – P. 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.09.016> (in Eng.).

Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E., Arrabal R., Kainer K.U., Zheludkevich M.L. (2016). Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review. *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 307. – P. 1165-1182. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.055> (in Eng.).

O'Hara M., Troughton S.C., Francis R., Clyne T.W. (2020). The incorporation of particles suspended in the electrolyte into plasma electrolytic oxidation coatings on Ti and Al substrates. *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 385. – P. 125354. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125354> (in Eng.).

Polunin A.V., Borgardt E.D., Shafееv M.R., Katsman A.V., Krishtal M.M. (2020). Effects of different nanoparticles additions on composition and properties of oxide layers formed by plasma electrolytic oxidation on cast Al-Si alloy. *Journal of Physics: Conference Series*. – Vol. 1713(1). – P. 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1713/1/012035> (in Eng.).

Polunin A.V., Cheretaeva A.O., Borgardt E.D., Rastegaev I.A., Krishtal M.M., Katsman A.V., Yasnikov I.S. (2021). Improvement of oxide layers formed by plasma electrolytic oxidation on cast Al-Si alloy by incorporating TiC nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*. – Vol. 423. – P. 127603. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127603> (in Eng.).

Shrestha S. (2010). Magnesium and surface engineering. *Surface Engineering*. – Vol. 26(5). – P. 313-316. <https://doi.org/10.1179/026708410X12736782825894> (in Eng.).

Zhang J., Dai W., Wang X., Wang Y., Yue H., Li Q., Yang X., Guo C., Li C. (2023). Micro-arc oxidation of Al alloys: mechanism, microstructure, surface properties, and fatigue damage behavior. *Journal of Materials Research and Technology*. – Vol. 23. – P. 4307-4333. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.028> (in Eng.).

Publication Ethics and Publication Malpractice in the journals of the «Central Asian Academic Research Center» LLP (Almaty)

For information on Ethics in publishing and Ethical guidelines for journal publication see <http://www.elsevier.com/publishingethics> and <http://www.elsevier.com/journal-authors/ethics>.

Submission of an article to the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan implies that the work described has not been published previously (except in the form of an abstract or as part of a published lecture or academic thesis or as an electronic preprint, see <http://www.elsevier.com/postingpolicy>), that it is not under consideration for publication elsewhere, that its publication is approved by all authors and tacitly or explicitly by the responsible authorities where the work was carried out, and that, if accepted, it will not be published elsewhere in the same form, in English or in any other language, including electronically without the written consent of the copyright-holder. In particular, translations into English of papers already published in another language are not accepted.

No other forms of scientific misconduct are allowed, such as plagiarism, falsification, fraudulent data, incorrect interpretation of other works, incorrect citations, etc. The National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan follows the Code of Conduct of the Committee on Publication Ethics (COPE), and follows the COPE Flowcharts for Resolving Cases of Suspected Misconduct (http://publicationethics.org/files/u2/New_Code.pdf). To verify originality, your article may be checked by the originality detection service Cross Check <http://www.elsevier.com/editors/plagdetect>.

The authors are obliged to participate in peer review process and be ready to provide corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. All authors of a paper should have significantly contributed to the research.

The reviewers should provide objective judgments and should point out relevant published works which are not yet cited. Reviewed articles should be treated confidentially. The reviewers will be chosen in such a way that there is no conflict of interests with respect to the research, the authors and/or the research funders.

The editors have complete responsibility and authority to reject or accept a paper, and they will only accept a paper when reasonably certain. They will preserve anonymity of reviewers and promote publication of corrections, clarifications, retractions and apologies when needed. The acceptance of a paper automatically implies the copyright transfer to the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan.

The Editorial Board of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan will monitor and safeguard publishing ethics.

Requirements for articles design for publication in the journal are available on the websites:

www.nauka-nanrk.kz

ISSN 2518-1483 (Online), ISSN 2224-5227 (Print)

<http://reports-science.kz/index.php/en/archive>

Managing Editor: T. Apendiev
Editors: D.S. Alenov, A. Shormakova
Computer layout: G.D. Zhadyranova

Signed for print: September 29, 2026
Format: 70×90 1/16. 34.5 printed sheets. Order No. 3.

*«Central Asian Academic Research Center» LLP
Almaty, Shevchenko Street, 28*