

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

Научный журнал

2024

№ 6

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-83494 от 24 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 28006

16+

Национальный исследовательский
Томский государственный университет
2024

Учредитель:

Национальный исследовательский Томский государственный университет

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА «ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»

Ю.М. Михайлов – председатель редакционного совета,
д-р хим. наук, профессор, академик РАН,
почетный доктор НИ ТГУ
Э.В. Галажинский – д-р психол. наук, профессор
И.М. Донник – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
А.А. Дынкин – д-р экон. наук, профессор,
академик РАН
С.А. Караганов – д-р ист. наук, профессор
С.Д. Каракотов – д-р хим. наук, профессор,
академик РАН
М.П. Кирпичников – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
А.В. Лопатин – д-р биол. наук, профессор,
академик РАН
Г.В. Сакович – д-р техн. наук, профессор,
академик РАН
В.П. Чехонин – д-р мед. наук, профессор,
академик РАН
А.Б. Ворожцов – д-р физ.-мат. наук,
профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

А.Б. Ворожцов – главный редактор, д-р физ.-мат. наук,
профессор
М.Г. Хмелева – ответственный секретарь,
канд. физ.-мат. наук
Д.Ю. Баланев – канд. психол. наук
С.М. Бобровников – д-р физ.-мат. наук
Н.А. Глущенко – канд. ист. наук
К.С. Голохваст – д-р биол. наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАО
В.М. Грузнов – д-р техн. наук
Е.А. Данилова – д-р полит. наук
И.А. Жуков – д-р техн. наук
А.Н. Ищенко – д-р физ.-мат. наук
В.А. Кагадей – д-р физ.-мат. наук, профессор
Ю.В. Кистенев – д-р физ.-мат. наук, профессор
А.С. Князев – д-р хим. наук
М.И. Лернер – д-р техн. наук
Е.М. Максимов – д-р техн. наук
Г.Я. Павловец – д-р техн. наук, профессор
А.С. Самойлов – д-р мед. наук, профессор РАН,
член-корреспондент РАН
В.И. Сачков – д-р хим. наук, доцент
В.С. Смирнов – канд. хим. наук
В.Г. Султанов – д-р физ.-мат. наук
Н.Н. Сысоев – д-р физ.-мат. наук, профессор
А. Тсатсакис – д-р биол. наук, иностранный член РАН
С.Э. Шипилов – д-р физ.-мат. наук
А.П. Шкуринов – д-р физ.-мат. наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

E-mail: safety@mail.tsu.ru

EDITORIAL COUNCIL LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

Yuri M. Mikhailov – Chairman of Editorial Council, Dr.Sc.
(Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy of
Sciences, Honorary Doctor of TSU
Eduard V. Galazhinskiy – Dr.Sc. (Psychology), Professor
Irina M. Donnik – Dr.Sc. (Biology), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander A. Dynkin – Dr.Sc. (Economics), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Sergey A. Karaganov – Dr.Sc. (History), Professor
Salis D. Karakotov – Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician
of the Russian Academy of Sciences
Mikhail P. Kirpichnikov – Dr.Sc. (Biology), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexey V. Lopatin – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of
the Russian Academy of Sciences
Gennady V. Sakovich – Dr.Sc. (Engineering), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Vladimir P. Chekhonin – Dr.Sc. (Medicine), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander B. Vorozhtsov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics),
Professor

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Vorozhtsov – Editor-in-Chief, Dr.Sc.
(Physics and Mathematics), Professor
Marina G. Khmeleva – Executive Editor, Cand.Sc.
(Physics and Mathematics)
Dmitry Yu. Balanev – Cand.Sc. (Psychology)
Sergei M. Bobrovnikov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikita A. Glushchenko – Cand.Sc. (History)
Kirill S. Golokhvast – Dr.Sc. (Biology), Professor
of the Russian Academy of Sciences, corresponding member
of the Russian Academy of Education
Vladimir M. Gruznov – Dr.Sc. (Engineering)
Elena A. Danilova – Dr.Sc. (Politics)
Ilya A. Zhukov – Dr.Sc. (Engineering)
Alexander N. Ishchenko – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Valery A. Kagadey – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Yury V. Kistenev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Alexey S. Knyazev – Dr.Sc. (Chemistry)
Marat I. Lerner – Dr.Sc. (Engineering)
Evgeniy M. Maksimov – Dr.Sc. (Engineering)
Georgiy Y. Pavlovets – Dr.Sc. (Engineering), Professor
Alexander S. Samoilov – Dr.Sc. (Medicine), Professor
of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the
Russian Academy of Sciences
Victor I. Sachkov – Dr.Sc. (Chemistry), Associate professor
Vladimir S. Smirnov – Cand.Sc. (Chemistry)
Valery G. Sultanov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikolay N. Sysoev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Aristidis Tsatsakis – Dr.Sc. (Biology), Foreign Member of the
Russian Academy of Sciences
Sergey E. Shipilov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Alexander P. Shkurinov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor,
Corresponding member of the Russian Academy of Sciences

СОДЕРЖАНИЕ

Технологии противодействия техногенным и террористическим угрозам

Тивилёва М.И., Грузнов В.М., Кихтенко В.А., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Аксенов В.А. Влияние динамики следов взрывчатых веществ на возможности их регистрации газохроматографическим и лидарным методами	5
Ворожцов А.Б., Парватов Г.Н., Замбалов С.Д., Донченко В.А., Скрипняк В.В., Клоков А.В. Прочность композитных элементов универсального индукционного металлоискателя, созданных по технологии 3D печати	15

Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

Соколов С.Д., Ворожцов А.Б., Родкевич Н.Г., Лернер М.И. Получение и анализ характеристик вязкой пасты nAl/НТРВ для высокоэнергетических материалов	23
---	----

Технологии материаловедения

Марков М.А., Дюскина Д.А., Беляков А.Н., Чекуряев А.Г., Быкова А.Д., Николаев А.Н. Изучение влияния содержания углеродного компонента в составе реакционно-спеченной карбидокремниевой керамики на ее физико-механические характеристики	32
Волокитина А.В., Лапин И.Н., Светличный В.А. Поверхностно-усиленная спектроскопия комбинационного рассеяния на плазмонных наночастицах Au-Ag, полученных импульсной лазерной абляцией	40

Биотехнологии

Бабаев А.С., Марченко Е.С., Семёнов А.Р., Гарин А.С. Технологические особенности обеспечения отделочной обработки сплавов и материалов медицинского назначения	50
---	----

Вызовы мировой политики

Троицкий Е.Ф., Юн С.М. Организация Договора о коллективной безопасности в современных условиях (2022–2023 гг.)	59
Погорельская А.М. Механизмы стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь	70

CONTENTS

Counter-terrorism and industrial safety technologies

Tivileva M.I., Gruznov V.M., Kikhtenko A.V., Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Aksenov V.A. The influence of the dynamics of traces of explosives on the possibility of their registration by gas chromatographic and lidar methods 5

Vorozhtsov A.B., Parvatov G.N., Zambalov S.D., Donchenko V.A., Skripnyak V.V., Klokov A.V. Universal induction metal detector based on 3D composite printing 15

Chemical technology of fuels and high-energy substances

Sokolov S.D., Vorozhtsov A.B., Rodkevich N.G., Lerner M.I. Preparation and performance analysis of viscous nAl/HTPB paste for high-energy materials 23

Materials science technologies

Markov M.A., Dyuskina D.A., Belyakov A.N., Chekuryaev A.G., Bykova A.D., Nikolaev A.N. Study of the influence of the carbon component content in the composition of reaction-sintered silicon carbide ceramics on its physical and mechanical characteristics 32

Volokitina A.V., Lapin I.N., Svetlichnyi V.A. Surface-enhanced Raman spectroscopy of plasmonic Au-Ag nanoparticles produced by pulsed laser ablation 40

Biotechnologies

Babaev A.S., Marchenko E.S., Semenov A.R., Garin A.S. Technological features of providing finishing processing of alloys and materials for medical industry 50

Challenges in World politics

Troitsky E.F., Yun S.M. The Collective Security Treaty Organization in the Contemporary World (2022-2023) 59

Pogorelskaya A.M. Mechanisms for promotion of innovative activities in the Republic of Belarus 70

Технологии противодействия техногенным и террористическим угрозам

Научная статья
УДК 543.544, 535.3
doi: 10.17223/29491665/5/1

Влияние динамики следов взрывчатых веществ на возможности их регистрации газохроматографическим и лидарным методами

Мария Ильинична Тивилёва¹, Владимир Матвеевич Грузнов²✉,
Андрей Владимирович Кихтенко³, Сергей Михайлович Бобровников⁴,
Евгений Владимирович Горлов⁵, Валерий Анатольевич Аксенов⁶

^{1, 2, 3} *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИНГГ) СО РАН, Новосибирск, Россия*
² *Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*
^{4, 5} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*
^{4, 5} *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Новосибирск, Россия*
⁶ *Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники», Новосибирск, Россия*
✉ GruznovVM@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Рассмотрены три процесса динамики следов взрывчатых веществ (ВВ): диффузия паров ВВ через упаковку, перенос микроколичеств ВВ с отпечатками пальцев рук и естественная сублимация (испарение) следовых количеств ВВ. Все три вида динамики имеют практическое значение при проведении антитеррористического контроля. Представлены результаты экспериментальных исследований регистрации изменений следов ВВ с помощью двух методов: газовой хроматографии и лазерно-индуцированной флуоресценции при лазерной фрагментации молекул ВВ.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, динамика следов, следы на ткани, следы на стекле, отпечаток пальца, контроль, лидар, газовый хроматограф

Благодарности: исследование выполнено в рамках ПФНИ Российской Федерации, проект FWZZ-2022-0027 (ИНГГ СО РАН) «Новые технологии внелабораторного химического анализа и контроля, прецизионных измерений физических полей природных и техногенных объектов», руководитель канд. техн. наук А.Л. Макасы.

Для цитирования: Тивилёва М.И., Грузнов В.М., Кихтенко В.А., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Аксенов В.А. Влияние динамики следов взрывчатых веществ на возможности их регистрации газохроматографическим и лидарным методами // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 5–14. doi: 10.17223/29491665/6/1

Original article
doi: 10.17223/29491665/6/1

The influence of the dynamics of traces of explosives on the possibility of their registration by gas chromatographic and lidar methods

Maria I. Tivileva¹, Vladimir M. Gruznov²✉, Andrey V. Kikhtenko³,
Sergey M. Bobrovnikov⁴, Evgeniy V. Gorlov⁵, Valery A. Aksenov⁶

^{1, 2, 3} *Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*
² *Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*
^{4, 5} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*
^{4, 5} *Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*
⁶ *Novosibirsk Branch the Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
“Design and Technology Institute of Applied Microelectronics”, Novosibirsk, Russian Federation*
✉ GruznovVM@ipgg.sbras.ru

Abstract. In the practice of ensuring anti-terrorist control, various sampling gas-analytical detectors of explosives are used. Methods of remote/non-contact monitoring of objects for the presence of traces of explosives on their surface are also actively developing. Among them, the lidar method based on the use of laser-induced fluorescence in the laser fragmentation of molecules

of explosives (LIF-LF) should be noted. It is of practical interest to compare the effectiveness of detecting extremely small vapors and traces of explosives using a remote LIF-LF and a gas analytical method for monitoring the same objects.

The paper considers three processes of explosive trace dynamics: diffusion of explosive vapors through packaging, transfer of trace amounts of explosives with fingerprints, and natural sublimation of trace amounts of explosives. All three types of dynamics are of practical importance in conducting anti-terrorist control.

The article presents the results of experimental studies of changes in traces of explosives using two methods: the gas chromatography method and the LIF-LF method. The characteristics of both methods for recording the dynamics of extremely small traces of explosives are determined.

When comparing the methods, it was shown that TNT vapors with a concentration of 10^{-12} g/cm³ on the tissue surface are detected by a gas chromatograph and are not detected by lidar based on the LIF-LF method. Using the example of exposed explosive simulators, the effectiveness of their lidar control from a distance of 5 m was shown, and it was determined that the sampling method detects only TNT vapors above the exposed simulator and does not detect RDX and PETN vapors in conditions identical to lidar detection under normal climatic conditions. The LIF-LF method provides control of trace amounts of TNT at the level of 53 ng/cm² for 2.5 seconds with a probability of 97-99%, and RDX at the level of 5.3 ng/cm² with an average probability of 87%.

It has been experimentally shown that evaporation/sublimation from glass of a thin TNT film with an initial surface density of 100 ng/cm² at room temperature reduces the concentration of TNT vapor above the film in 2.6 hours to a level equal to the detection threshold of modern gas analytical devices. In this case, the concentration of TNT on the glass becomes equal to 12 ng/cm². Control during further sublimation of the thin film is possible for the next 5 hours only by the LIF-LF method with a limiting theoretical threshold sensitivity of 1 ng/cm².

The possibility of remote control by the LIF-LF method of trace amounts of RDX in the first few dozen fingerprints on a slide, as a luggage model, is shown.

In general, it is shown that the LIF-LF method provides registration of traces of explosives on objects in cases where the concentration of vapor explosives is below the threshold sensitivity of gas analytical detectors. Thus, lidar detection of trace amounts complements and significantly expands the possibilities of monitoring objects containing explosives.

The research results presented in the article demonstrate the relevance of creating portable lidars that can provide significantly higher efficiency in monitoring microparticles than explosive vapors.

Keywords: explosive, trace dynamics, traces on fabric, traces on glass, fingerprint, control, lidar, gas chromatograph

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the Russian Federation Fundamental Research Program, project FWZZ-2022-0027 “New technologies for extracellular chemical analysis and control, precision measurements of physical fields of natural and man-made objects”, head of research A.L. Makas.

For citation: Tivileva, M.I., Gruzov, V.M., Kikhtenko, A.V., Bobrovnikov, S.M., Gorlov, E.V. & Aksenov, V.A. (2024). The influence of the dynamics of traces of explosives on the possibility of their registration by gas chromatographic and lidar methods. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 5–14 (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/1

Введение

Эффективность антитеррористического контроля по регистрации следов ВВ на объектах зависит от информативности применяемых методов и от количества следов и динамики их изменения во времени.

Применяемые средства контроля следов подразделяются на широко применяемые пробоотборные (отбор паров и твердых частиц с поверхности объектов) [1] и дистанционные, среди которых наиболее развиты лидарные [2].

Эти методы существенно различаются по химико-физическим основам формирования их отклика на следы ВВ, поэтому их применение как независимых методов представляет существенный интерес для оценки эффективности контроля следов.

Цель работы: экспериментальное определение характеристик контроля следов ВВ современными независимыми лидарным и пробоотборным газоаналитическими методами, включая их применение для контроля одних и тех же объектов.

Методы и материалы

Регистрация паров ВВ

Для регистрации паров ВВ использовались портативные экспрессные поликапиллярные газохроматографические обнаружители: «ЭХО-М» (стоит на вооружении подразделений МВД России) и его аналог «ЭХО-В-ИДПС» с воздухом в качестве газа-носителя [3]. Хроматографы укомплектованы выносным малогабаритным пробоотборным устройством с вихревым режимом работы, обеспечивающим отбор с расстояния 2–10 см от поверхности.

Сбор паров ВВ в экспериментах проводили пробоотборным устройством на специальный концентратор с расстояния 2–3 см от обследуемых объектов.

Время отбора пробы на концентратор составляет до 20 с, а время анализа проб – от 20 до 40 с. Порог контроля концентрации паров тринитротолуола (ТНТ) 10^{-14} г/см³ в воздухе около объекта или 10 пг ТНТ в пробе.

Внешний вид портативного поликапиллярного газоанализатора «ЭХО-В-ИДПС» с вспомогательными устройствами показан на рис. 1.



Рис. 1. Хроматограф «ЭХО-В-ИДПС»: 1 – хроматограф; 2 – пробоотборное устройство

Fig. 1. EKHO-V-IDTS chromatograph: 1 – chromatograph, 2 – sampling device

Регистрация твердых следов ВВ

Для регистрации твердых следов ВВ на объектах использовался лидарный детектор следов взрывчатых веществ (ЛДС ВВ), представленный на рис. 2 [4, 5].

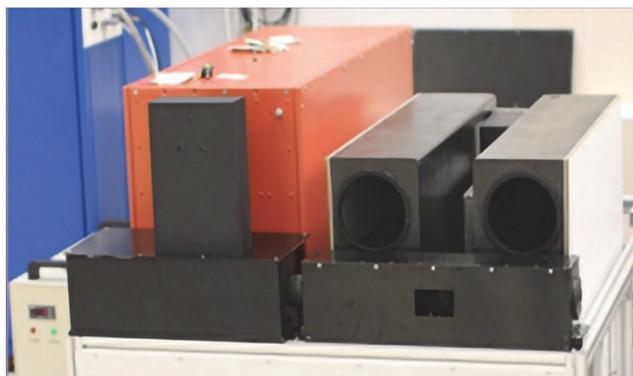


Рис. 2. Лидарный детектор следов ВВ

Fig. 2. Lidar detector of traces of explosives

Принцип действия ЛДС ВВ основан на использовании комбинации эффектов лазерной фрагментации паров азотсодержащих ВВ и лазерно-индуцированной резонансной флуоресценции NO-фрагментов (ЛИФ-ЛФ), возбуждаемых из второго колебательного состояния [6]. При этом образование NO-фрагментов идет при взаимодействии излучения как с твердой фазой следа, так и с паром над поверхностью, возникающим в результате лазерной десорбции вещества следа. В приборе использован лидарный принцип импульсного лазерного зондирования, что позволяет проводить обнаружение следов ВВ на дистанциях 5–10 м. Время измерения на дистанции 5 м составляет 2,5 с при пороговой чувствительности 1 нг/см².

В качестве источника возбуждающего излучения в ЛДС используется эксимерный лазер на среде KrF с

узкой линией генерации, с возможностью настройки на частоту резонансного перехода в голове полосы поглощения молекулы NO (переход $A^2\Sigma^+(v' = 0) \leftarrow X_2\Pi(v'' = 2)$); длина волны возбуждающего излучения 247,865 нм. Эта же длина волны используется для десорбции и фрагментации молекул ВВ следа.

Объекты исследований и схема сравнительных испытаний

В экспериментах использовали имитаторы ТНТ, гексогена и ТЭН массой 200 г производства АО ГосНИИ «Кристалл». В качестве объектов исследования использовали:

- коробку из гофр-картона с имитатором ТНТ. Размер коробки 120 × 65 × 34 мм. В коробку помещали имитатор ТНТ массой 200 г и сверху закрывали черным сатином (см. рис. 3);
- открытые образцы имитаторов ТНТ, гексогена (RDX) и ТЭН (PETN);
- следы ТНТ размером 1 см² на предметном стекле с поверхностной плотностью 100 нг/см²;
- следы отпечатков пальца с гексогеном на предметном стекле (рис. 4).



Рис. 3. Коробка с имитатором ТНТ

Fig. 3. Box with TNT simulator

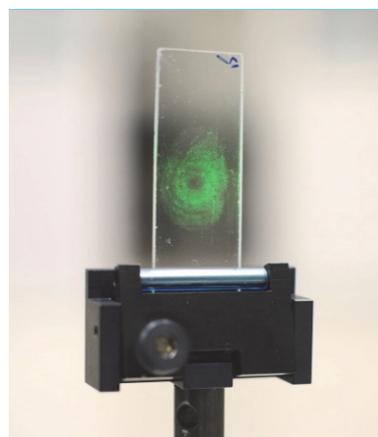


Рис. 4. Предметное стекло с отпечатком пальца с гексогеном

Fig. 4. Glass slide with a fingerprint containing hexogen

Схема сравнительных испытаний методов контроля твердых следов ВВ и пара приведена на рис. 5.

Отбор паров у контролируемых объектов проводили с расстояния 2–6 см от поверхности объектов. Лидарный контроль осуществляли с расстояния 5 м до объекта исследования.

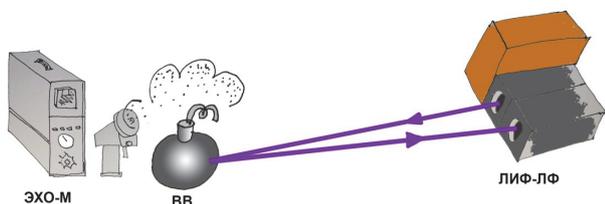


Рис. 5. Схема сравнительных испытаний методов контроля следов ВВ

Fig. 5. Scheme of comparative tests of methods for monitoring traces of explosives

Результаты и обсуждение

Регистрация двумя методами динамики следов на ткани

Анализ паров проводился при следующих условиях: отбор воздуха пробоотборным устройством с расстояния 2 см от поверхности ткани сразу после закладки ТНТ, а также через 2,5 и 3 ч после закладки имитатора; лидарный контроль осуществляли с расстояния 5 м от ЛДС ВВ до объекта исследования.

Эксперименты подтвердили высокую проникаемость ткани для паров ТНТ, а именно: непосредственно после закладки ТНТ в коробку концентрация пара ТНТ у поверхности ткани превышала 10^{-12} г/см³, что достаточно для контроля газовым хроматографом с порогом 10^{-14} г/см³.

Одновременно было установлено, что с помощью используемого лидарного детектора не удается обнаружить ТНТ на поверхности ткани даже спустя 24 ч после закладки ТНТ. Следует отметить, что лазерное излучение при лидарном зондировании взаимодействует с молекулами и пара, и микрочастиц ТНТ. По-видимому, в данном случае имела место недостаточная концентрация и пара, и микрочастиц для их обнаружения методом ЛИФ-ЛФ. Данный пример показывает приоритет пробоотборного газоаналитического обнаружения ТНТ в тех случаях, когда уровни следов ТНТ на поверхности недостаточны для контроля лидаром.

Регистрация открытых имитаторов ТНТ, гексогена и ТЭН

При отборе паров у поверхности имитаторов на концентратор вихревым пробоотборником в регистрируемых хроматограммах отсутствовали пики как

гексогена, так и ТЭН. Одновременно в экспериментах было показано [7], что лидаром открытые имитаторы гексогена и ТЭН уверенно регистрируются. Примеры величин откликов лидара с расстояния 5 м, значительно превышающий шум, приведены на рис. 6, где П – пороговая чувствительность лидара. Эти примеры показывают существенное преимущество лидарного ЛИФ-ЛФ контроля труднолетучих ВВ по сравнению с контролем по парам газовым хроматографом с пороговой чувствительностью 10^{-14} г/см³ по ТНТ.

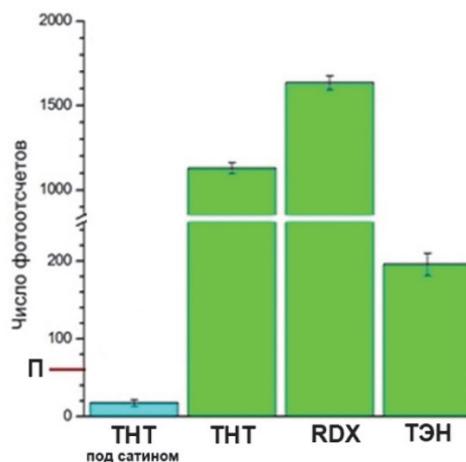


Рис. 6. Лидарные отклики при контроле имитаторов ВВ

Fig. 6. Lidar responses during testing of explosive simulators

Регистрация динамики следов на стекле двумя методами

В реальных условиях применения специальной поисковой техники, а также в отдельных лабораторных экспериментах иногда наблюдалось снижение во времени вероятности обнаружения следовых количеств ВВ. Изучение закономерностей сохраняемости следов ВВ имеет большое практическое значение при проведении оперативного контроля, так как определяет не только вид используемой техники, но и временные параметры эффективного её применения для контроля.

Для сравнения возможностей определения динамики испарения следов ТНТ было проведено моделирование процесса сублимации следов ТНТ во времени с предметного стекла. Следовые количества ТНТ образовывали нанесением на предметное стекло раствора ТНТ в ацетонитриле/ацетоне с концентрацией 10^{-6} г/см³. При помощи дозированной микропипетки наносили полученный раствор объемом 10^{-1} см³, содержащий 100 нг ТНТ. Площадь поверхности, на которую был нанесен раствор ТНТ, составлял 1 см². Так образовывали на стёклах поверхностную концентрацию 100 нг/см². Чтобы проследить за динамикой испарения, провели 5 экспериментов, и

для каждого из пяти экспериментов было подготовлено 10 предметных стекол.

Последовательно через равные промежутки времени (15 мин) только один раз с каждого образца, чтобы исключить ускоренную сублимацию, осуществляли отбор пробы на концентратор с помощью вихревого пробоотборника «ПОУ-И» (рис. 7) с фиксированным объемом прокачиваемого воздуха с параметрами ТНТ – 500 см³ и фиксированным потоком – 600 см³/мин. Пробы анализировали на газовом хроматографе «ЭХО-В-ИДПС».



Рис. 7. Отбор пробы воздуха с поверхности предметного стекла

Fig. 7. Sampling air from the surface of a glass slide

На рис. 8 показано изменение во времени концентрации паров (левая шкала) и поверхностной концентрации (правая шкала) ТНТ, полученное в пяти экспериментах.

Разброс результатов измерений на рис. 8 объясняется рядом факторов: наиболее существенный из них – это неидентичность по структуре сформированных следов на стеклах.

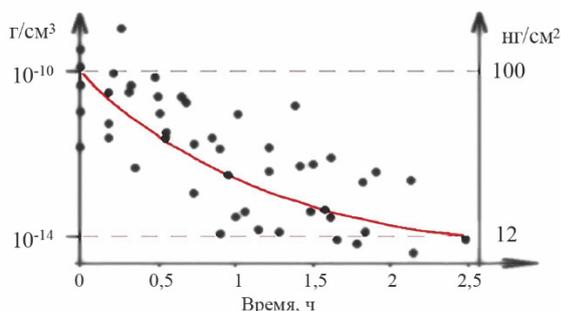


Рис. 8. Результаты контроля концентрации паров ТНТ по измерениям в пяти экспериментах

Fig. 8. Results of monitoring the concentration of TNT vapors based on measurements in 5 experiments

Из проведенных экспериментов (см. рис. 8) следует, что спустя несколько часов испарение следового количества 100 нг ТНТ, распределенного на площади 1 см², приводит к такому уровню концентрации пара над поверхностью (10⁻¹⁴ г/см³), который уже не обнаруживается газоаналитическими приборами даже при использовании пробоотборных методов накопления паров. Учитывая выявленный экспоненциальный спад концентрации паров ТНТ (рис. 8) и современный порог обнаружителей 10⁻¹⁴ г/см³, можно определить время, спустя которое обнаружение паров становится невозможным, оно составляет 2,6 ± 0,3 ч для исходной поверхностной плотности 100 нг/см² на предметном стекле.

Очевидно, что на различных по своей структуре и химическому составу поверхностях упомянутое время сублимации, приводящее к минимальному обнаруживаемому порогу концентрации паров ВВ, будет различаться. Использование же предметного стекла в качестве подложки для ТНТ, дает характерную картину процесса сублимации.

Регистрируемая концентрация паров ТНТ пропорциональна текущей поверхностной плотности [8, 9], поэтому через 2,6 ч непрерывного испарения поверхностная плотность уменьшится со 100 до 12 нг/см² (см. рис. 8, правая ордината).

Используя полученную зависимость для спада концентрации во времени (рис. 8) $f(t) = 8,025 \times \exp(-t/75)$, где время в минутах, можно определить, что через 7 ч испарения концентрация пара будет на уровне 4 × 10⁻¹⁶ г/см³, а поверхностная плотность микрочастиц ТНТ составит около 0,4 нг/см².

В работе [10] отмечено, что согласно расчетным оценкам пороговая чувствительность метода ЛИФ-ЛФ по поверхностной плотности следовых количеств нитросоединений ВВ может быть на уровне 1 нг/см². То есть через время, большее 2,6 ч, остаток на стекле несублимированного тротила ещё может быть зарегистрирован методом ЛИФ-ЛФ, в то время как пары тринитротолуола уже не будут регистрироваться газохроматографическим обнаружителем с пороговой чувствительностью 10⁻¹⁴ г/см³.

В целом же сравнение возможностей методов контроля остатков следов при сублимации тонких пленок ТНТ газохроматографическим по парам и лидарным по микрочастицам приводит к целесообразности комплексирования этих методов с целью увеличения эффективности контроля следов.

Регистрация динамики отпечатков пальца с гексогеном на стекле

Поскольку более высокая чувствительность макета ЛДС ВВ была экспериментально получена именно к гексогену (см. рис. 6), то для оценки возможности контроля следов ВВ в отпечатках пальцев

рук в качестве определяемого вещества использовали гексоген.

Для моделирования переноса ВВ участник испытаний сначала прижимал палец к поверхности чашки Петри, содержащей мелкодисперсный порошок гексогена (ГОСТ В 5207-61). Масса гексогена, равная 5 мг, была равномерно распределена по дну чашки Петри диаметром 105 мм. На рис. 9 представлен момент переноса ВВ на палец микрочастиц гексогена.

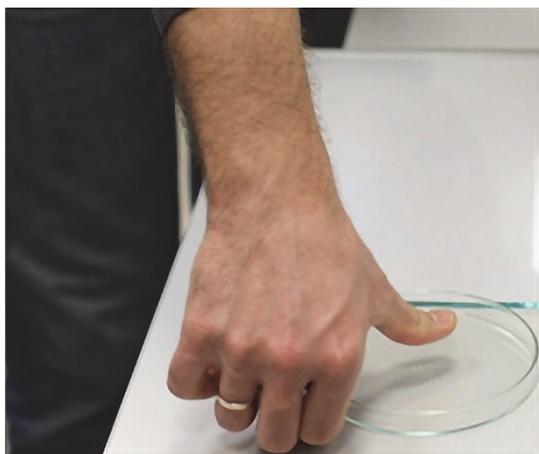


Рис. 9. Момент переноса ВВ на палец

Fig. 9. The moment of transferring the explosive to the finger

Затем палец со следами ВВ неоднократно прикладывался к поверхности чистых предметных стекол (ГОСТ 9284-75), т.е. оставались отпечатки. Диаметр отпечатка составил примерно 18 мм. Таким способом на 100 чистых предметных стеклах последовательно было нанесено сто отпечатков пальца.

Для контроля следовых количеств гексогена в отпечатках пальцев рук использовали: первый, затем каждый десятый, включая сотый отпечатки пальца [4].

На рис. 4 представлен внешний вид предметного стекла с отпечатком пальца, содержащего следы гексогена, подсвеченный лазерным целеуказателем, используемым при наведении оптического блока ЛДС ВВ на объект исследования. Лазерный пучок размером 6×3 мм наводился в центр отпечатка. Для оценки фонового сигнала использовалось чистое предметное стекло.

Образец со следами гексогена устанавливали на расстоянии 5 м от первого оптического элемента приемной оптической системы макета ЛДС ВВ. Далее производили импульсное лазерное зондирование поверхности образца с плотностью энергии в лазерном импульсе около 30 мДж/см^2 с регистрацией оптического отклика в виде числа фотонов, зарегистрированных системой фотодетектирования ЛДС ВВ. Параметры зондирующего лазерного излучения: 50 импульсов при частоте следования 20 Гц перестраиваемого КrF-лазера с узкой линией генерации 247,867 нм, время одного анализа 2,5 с. Оптический сигнал лазерно-индуцированной флуоресценции регистрировался приемной оптической системой спектрометра, которая осуществляла спектральное выделение $\gamma(0, 0)$ -полосы флуоресценции NO-фрагментов нитросоединений в диапазоне длин волн 222–227 нм с пропуском $\sim 25\%$.

На рис. 10 представлена интенсивность лазерно-индуцированной флуоресценции NO-фрагментов гексогена исследованных образцов, нормированная относительно первого отпечатка пальца.

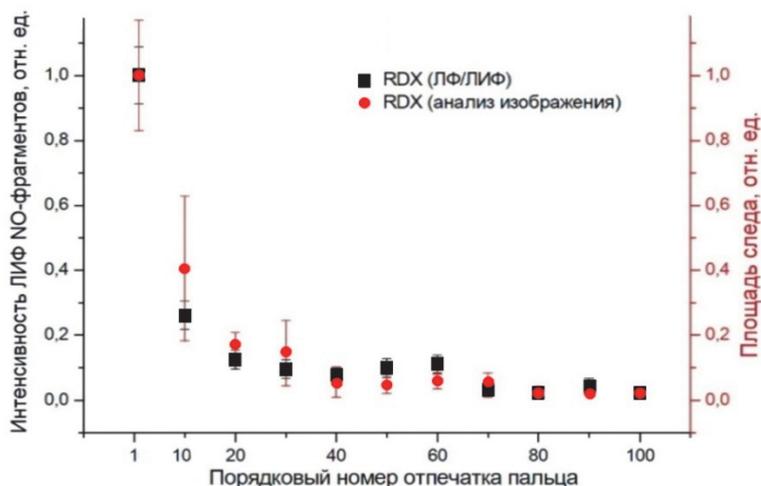


Рис. 10. Зависимость интенсивности лазерно-индуцированной флуоресценции и площади следа от порядкового номера отпечатка пальца. Площадь следа определена по анализу изображения следа

Fig. 10. Dependence of laser-induced fluorescence intensity and trace area on the fingerprint serial number. The trace area was determined by analyzing the trace image



Рис. 11. Вероятность обнаружения гексогена в отпечатке пальца

Fig. 11. Probability of detecting hexogen in a fingerprint

Сравнительные характеристики методов

Параметр	ЭХО-М/ЭХО-В	ЛДС ВВ (ЛИФ-ЛФ)
Время анализа, с	40	2,5
Дистанция до объекта контроля, м	≤0,1	5
Пары ТНТ, г/см ³	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹²
ТНТ в упаковке, укрытой тканью	+	-
Открытый имитатор ТНТ	+	+
Открытые имитаторы RDX, ТЭН	-	+
Микроследы (ТНТ/RDX), 1,9 см ² , нг/см ²	53	53/5,3
Отпечатки пальцев (RDX), номер отпечатка пальца, обнаруживаемого с вероятностью не менее 99%	-	+(60)
Сублимация (ТНТ), ч (время, в течение которого возможен контроль)	2,6	7

Параллельно с оценкой интенсивности лазерно-индуцированной флуоресценции проводился количественный попиксельный анализ макрофотографий следов пальцев. Анализ показал, что та часть площади следа, которая содержит микрочастицы ВВ, значительно уменьшается при переходе от 1-го к 100-му отпечатку пальца (рис. 12) [10].

Учитывая, что лазерное излучение с длиной волны 247,865 нм слабо проникает в гексоген (глубина проникновения составляет около 55 нм), определяющим при оценке эффективности метода ЛИФ-ЛФ будет площадь следа, а не масса гексогена в нем. С учетом этой особенности очевидно, что чувствительность метода в терминах поверхностной концентрации (мкг/см²) будет зависеть от структуры следа. Изменение структуры следа естественно отражается на изменении числа зарегистрированных фотоотчетов и, как следствие, на вероятности Р его обнаружения (рис. 11).

Возможную причину скачкообразных изменений числа сигнальных фотоотчетов и как следствие – ве-

роятности правильного контроля ВВ после 60-го отпечатка можно объяснить неоднородным распределением перенесенного взрывчатого вещества в отпечатках пальца. При этом газохроматографическим методом отпечатки пальцев рук со следами гексогена не обнаруживаются.

Заключение

Исследование двумя независимыми методами – газовой хроматографией и лазерно-индуцированной флуоресценцией при лазерной фрагментации молекул ВВ – динамики следов наиболее распространенных ВВ (ТНТ и гексоген) позволило выявить ряд особенностей методов, приведенных в таблице.

Для наглядности сравнения методов на рис. 12 представлены условные соотношения технических характеристик каждого из рассмотренных методов при контроле ВВ в различных условиях (красным цветом отмечены результаты применения ЭХО-М (ЭХО-В), синим цветом – применение ЛИФ-ЛФ).

Экспериментально определены характеристики методов регистрации динамики предельно малых лидарного (ЛИФ-ЛФ) и газохроматографического следов ВВ.

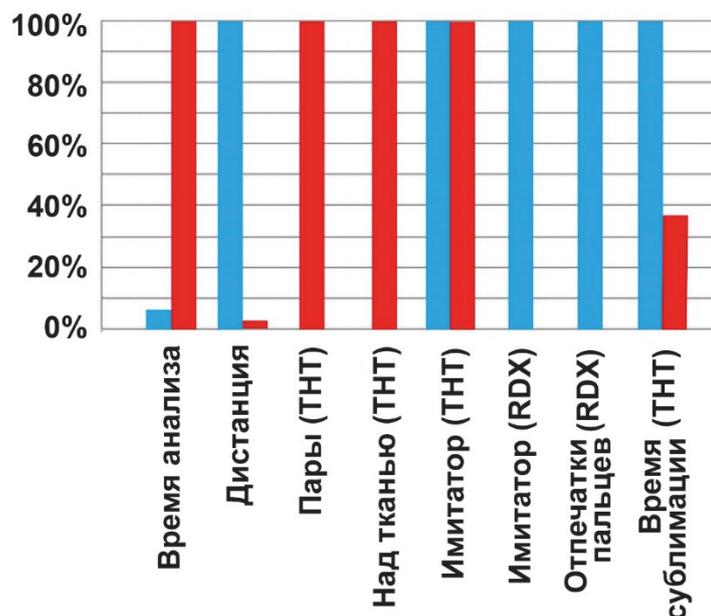


Рис. 12. Сравнение двух методов контроля ВВ

Fig. 12. Comparison of two methods of explosive control

На примере отпечатков на стекле пальцев рук, содержащих микроколичества гексогена, показана высокая вероятность правильного контроля первых 60 отпечатков ВВ лидарным методом.

Испарение / сублимация со стекла тонкой пленки ТНТ с концентрацией 100 нг/см^2 за 2,6 ч уменьшает концентрацию пара над пленкой до порога контроля современных газохроматографических приборов 10^{-14} г/см^3 по ТНТ. Дальнейшее испарение не доступно газохроматографическому контролю, но доступно лидарному контролю по микрочастицам еще в течение порядка 5 ч.

Сравнительными экспериментами по контролю в одинаковых условиях открытых имитаторов ТНТ, гексогена и ТЭН показано преимущество лидарного

контроля перед газохроматографическим с современным высоким порогом по регистрации концентрации паров ТНТ 10^{-14} г/см^3 .

Показано, что динамика следов ВВ ограничивает применение существующей досмотровой газоотборной техники, при этом совместное применение рассмотренных в статье методов расширяет возможности антитеррористического контроля объектов с ВВ [11].

Представленные в статье результаты исследований в целом обосновывают актуальность создания портативных лидаров для массового контроля, обеспечивающих значительно более высокую эффективность контроля следов ВВ по микрочастицам, чем по парам.

Список источников

1. Аксёнов В.А., Грузнов В.М., Кихтенко А.В., Тивилёва М.И., Шишкин Е.В. Обнаружение взрывчатых веществ с использованием переносной аппаратуры газового анализа: учебное пособие / под ред. В.М. Грузнова. М. : ФКУ НПО «СТиС» МВД России, 2024. 88 с.
2. Скворцов Л.А. Лазерные методы обнаружения следов взрывчатых веществ на поверхностях удаленных объектов // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 1. С. 1–11.
3. Грузнов В.М., Балдин М.Н., Прямов М.В., Максимов Е.М. Определение концентрации паров взрывчатых веществ с дистанционным автоматизированным отбором проб при контроле объектов // Журнал аналитической химии. 2017. Т. 72, № 11. С. 1000–1005. doi: 10.7868/S0044450217110032
4. Тивилёва М.И., Кихтенко А.В., Бобровников С.М., Горлов Е.В. Дистанционный детектор следов взрывчатых веществ // Сборник материалов XX Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск, 2014. С. 41–44.
5. Тивилёва М.И., Аксёнов В.А., Горлов Е.В., Жарков В.И., Панченко Ю.Н., Бобровников С.М., Пучикин А.В. Дистанционное обнаружение следов высокоэнергетических материалов // Научно-технический портал МВД России. 2016. № 4 (20). С. 27–30.
6. Бобровников С.М., Горлов Е.В. Лидарный метод обнаружения паров взрывчатых веществ в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1055–1061.

7. Gruznov V.M., Bobrovnikov S.M., Baldin M.N., Gorlov E.V., Vorozhtsov A.B., Tivileva M.I. The effect of the high efficiency of laser detection of objects containing explosives by solid traces detection compared to vapours detection // *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 2020. Vol. 19, № 4. P. 319–327. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2020034413
8. Тивилёва М.И., Грузнов В.М., Балдин М.Н., Кихтенко В.А., Науменко И.И. Определение изменения во времени концентрации пара 2,4,6-тринитротолуола при сублимации его следов с поверхности стекла // *Аналитика и контроль*. 2021. Т. 25, № 3. С. 222–229. doi: 10.15826/analitika.2021.25.3.003
9. Tivileva M.I., Gruznov V.M., Baldin M.N., Vorozhtsov A.B., Kikhtenko A.V., Titov S.S. On the Evaporation Dynamics of Trinitrotoluene Microparticles on the Glass Surface // *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 2021. Vol. 20 (3). P. 17–25.
10. Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Мурашко С.Н., Панченко Ю.Н., Аксёнов В.А., Кихтенко В.А., Тивилёва М.И. Исследование эволюции поверхностной концентрации следов высокоэнергетических веществ в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим и лидарным методами // *Технологии безопасности жизнедеятельности*. 2023. № 1. С. 8–18.
11. Балдин М.Н., Бобровников С.М., Ворожцов А.Б., Горлов Е.В., Грузнов В.М., Жарков В.И., Панченко Ю.Н., Прямов М.В., Сакович Г.В. Об эффективности совместного дистанционного лазерного и газохроматографического обнаружения следов взрывчатых веществ // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31, № 12. С. 988–994. doi: 10.15372/AOO20181208

References

1. Aksenov, V.A., Gruznov, V.M., Kikhtenko, A.V., Tivileva, M.I. & Shishkin, E.V. (2024) *Obnaruzhenie vzryvchatykh veshchestv s ispol'zovaniem perenosnoy apparatury gazovogo analiza* [Detection of explosives using portable gas analysis equipment] : Textbook. Moscow : FKU NPO "STIS" of the Ministry of Internal Affairs of Russia.
2. Skvortsov, L.A. (2012) Laser methods for detecting traces of explosives on the surfaces of remote objects. *Quantum Electronics*. 42 (1). pp. 1–11. doi: 10.1070/QE2012v042n01ABEH014724
3. Gruznov, V.M., Baldin, M.N., Pryamov, M.V. & Maksimov, E.M. (2017) Determination of the concentration of explosive vapors with remote automated sampling in the control of objects. *Journal of Analytical Chemistry*. 72 (11). pp. 1155–1160. doi: 10.1134/S1061934817110041
4. Tivileva, M.I., Kikhtenko, A.V., Bobrovnikov, S.M., & Gorlov, E.V. (2014) Remote detector of traces of explosives. *Collection of materials of the XX International Symposium "Optics of the atmosphere and ocean. Atmospheric Physics"*. pp. 41–44.
5. Tivileva, M.I., Aksenov, V.A., Gorlov, E.V., Zharkov, V.I., Panchenko, Yu.N., Bobrovnikov, S.M. & Puchkin, A.V. (2016) Distantionnoe obnaruzhenie sledov vysokoenergeticheskikh materialov [Remote detection of traces of high-energy materials]. *Scientific and technical portal of the Ministry of Internal Affairs of Russia*. 4 (20). pp. 27–30.
6. Bobrovnikov, S.M. & Gorlov, E.V. (2010) Lidar method for remote detection of explosive vapors in the atmosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 24. pp. 235–241. doi: 10.1134/S1024856011030055
7. Gruznov, V.M., Bobrovnikov, S.M., Baldin, M.N., Gorlov, E.V., Vorozhtsov, A.B. & Tivileva, M.I. (2020) The effect of the high efficiency of laser detection of objects containing explosives by solid traces detection compared to vapours detection. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 19 (4). pp. 319–327. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2020034413
8. Tivileva, M.I., Gruznov, V.M., Baldin, M.N., Kikhtenko, A.V. & Naumenko, I.I. (2021) Opredelenie izmeneniya vo vremeni koncentracii para 2,4,6-trinitrotoluola pri sublimacii ego sledov s poverhnosti stekla [Determination of the time-dependent change in the vapor concentration of 2,4,6-trinitrotoluene during the sublimation of its traces from the glass surface]. *Analitika i kontrol' – Analytics and Control*. 25 (3). pp. 222–229. doi: 10.15826/analitika.2021.25.3.003
9. Tivileva, M.I., Gruznov, V.M., Baldin, M.N., Vorozhtsov, A.B., Kikhtenko, A.V. & Titov, S.S. (2021) On the Evaporation Dynamics of Trinitrotoluene Microparticles on the Glass Surface. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 20 (3). pp. 17–25.
10. Bobrovnikov, S.M., Gorlov, E.V., Zharkov, V.I., Murashko, S.N., Panchenko, Yu.N., Aksenov, V.A., Kikhtenko, A.V. & Tivileva, M.I. (2023) Study of the evolution of the surface concentration of traces of high energy substances in fingerprints by polarization macrophotographic and lidar methods. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 8–18. (In Russian). doi: 10.17223/7783494/1/3
11. Baldin, M.N., Bobrovnikov, S.M., Vorozhtsov, A.B., Gorlov, E.V., Gruznov, V.M., Zharkov, V.I., Panchenko, Yu.N., Pryamov, M.V. & Sakovich, G.V. (2019) Effectiveness of Combined Laser and Gas Chromatographic Remote Detection of Traces of Explosives. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 32 (1). pp. 227–233. doi: 10.1134/S1024856019020039

Информация об авторах:

Тивилёва Мария Ильинична – кандидат технических наук, научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: mtivileva@yandex.ru

Грузнов Владимир Матвеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия); профессор кафедры аналитической химии Новосибирского государственного университета (Новосибирск, Россия). E-mail: GruznovVM@ipgg.sbras.ru ORCID: 0000-0002-7903-3096

Кихтенко Андрей Владимирович – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, Россия). E-mail: kikht@mail.ru

Бобровников Сергей Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); заведующий Центром лазерного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск, Россия). E-mail: bsm@iao.ru

Горлов Евгений Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск, Россия). E-mail: gorlov_e@mail.ru

Аксенов Валерий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий инженер-конструктор Новосибирского филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «Конструкторско-технологический институт прикладной микрорелектроники» (Новосибирск, Россия). E-mail: duploduba@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Tivileva Maria I., Cand. Sc. (Engineering), researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: mtivileva@yandex.ru

Gruznov Vladimir M., Dr. Sc. (Engineering), chief researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation); professor, Department of analytical chemistry, Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: GruznovVM@ipgg.sbras.ru. ORCID: 0000-0002-7903-3096

Kikhtenko Andrey V., Cand. Sc. (Chemistry), researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: kikht@mail.ru

Bobrovnikov Sergey M., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, Department of optical and electronic systems and remote sensing, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); head of the Center for laser sensing of the atmosphere, Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: bsm@iao.ru

Gorlov Evgeny V., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, Department of optical and electronic systems and remote sensing, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); senior researcher, Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: gorlov_e@mail.ru

Aksenov Valery A., Cand. Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, leading design engineer, Novosibirsk branch of the Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences “Design and Technology Institute of Applied Microelectronics” (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: duploduba@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.08.2024; одобрена после рецензирования 19.09.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 28.08.2024; approved after reviewing 19.09.2024; accepted for publication 30.10.2024

Научная статья
УДК 620.179.1
doi: 10.17223/29491665/6/2

Прочность композитных элементов универсального индукционного металлоискателя, созданных по технологии 3D печати

Александр Борисович Ворожцов¹, Георгий Николаевич Парватов²,
Сергей Доржиевич Замбалов³, Валерий Алексеевич Донченко⁴,
Владимир Владимирович Скрипняк⁵, Андрей Владимирович Клоков⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *abv@mail.tomsknet.ru*

² *georgpa@yandex.ru*

³ *zambalovsd@gmail.com*

⁴ *don@spti.tsu.ru*

⁵ *skrp2012@yandex.ru*

⁶ *kav@mail.tsu.ru*

Аннотация. Представлены результаты анализа прочностных характеристик основных полимерных композитных конструктивных элементов универсального индукционного металлоискателя, созданных по технологии 3D печати. Результаты цифрового моделирования деформации и прочностных характеристик конструктивных элементов переносного металлоискателя при эксплуатационных нагрузках использованы для оптимизации конструкции в целях обеспечения герметичности элементов. На основе полученных результатов изготовлены образцы универсального индукционного металлоискателя для наземной и подводной инженерной разведки.

Ключевые слова: цифровое моделирование, индукционный металлоискатель, композитные материалы, кинематика, прочность, конструктив, оптимизация, герметизация

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Ворожцов А.Б., Парватов Г.Н., Замбалов С.Н., Донченко В.А., Скрипняк В.В., Клоков А.В. Прочность композитных элементов универсального индукционного металлоискателя, созданных по технологии 3D печати // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 15–22. doi: 10.17223/29491665/6/2

Original article
doi: 10.17223/29491665/6/2

Universal induction metal detector based on 3D composite printing

Alexander B. Vorozhtsov¹, Georgy N. Parvatov², Sergey D. Zambalov³,
Valery A. Donchenko⁴, Vladimir V. Skripnyak⁵, Andrey V. Klokov⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *abv@mail.tomsknet.ru*

² *georgpa@yandex.ru*

³ *zambalovsd@gmail.com*

⁴ *don@spti.tsu.ru*

⁵ *skrp2012@yandex.ru*

⁶ *kav@mail.tsu.ru*

Abstract. An analysis of modern developments of dual-use induction metal detectors is carried out. It has been established that in our country and especially abroad, intensive work is underway to create new search devices with improved tactical, technical and operational characteristics. The main attention is paid to the development of additive 3D printing technologies based on composite materials. The main problems solved in the article are: the choice of structural composite material; research and optimization of its physical and technical properties in specific structural elements; specification of the geometry of structural elements and the design of the product as a whole, taking into account extreme operating conditions on land and in water at depths of up to 60 m; strength analysis of the product design with assessment of maximum stresses and displacements; optimization of the kinematic

diagram of the product. Engineering research of the structure was carried out using computer modeling and CAD programs. Regularities have been established for the maximum deflection of the container walls of the signal processing unit and the power supply unit depending on the external water pressure (immersion depth), thickness and width of the edge of rectangular containers. The geometric parameters of the design have been optimized. Essentially, a technology has been developed for the manufacture of portable metal detectors based on 3D printing with composite materials. Using this technology, a prototype of a universal induction metal detector was manufactured and tested. When completed, the search device is equipped with a sound, LED and vibration sensor synchronous indication system. The developed composite model of a universal metal detector has tactical, technical, search and ergonomic characteristics at the level of the best foreign analogues of portable metal detectors.

Keywords: digital modeling, induction metal detector, composite materials, kinematics, strength, design, optimization, sealing

Acknowledgments: The study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Vorozhtsov, A.B., Parvatov, G.N., Zambalov, S.D., Donchenko, V.A., Skripnyak, V.V. & Klokov, A.V. (2024). Universal induction metal detector based on 3D composite printing. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 15–22. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/2

Введение

Анализ современных научно-технических исследований по инженерно-поисковой тематике свидетельствует, что у нас в стране и за рубежом интенсивно ведутся работы по модификации известных и созданию новых переносных поисковых средств с улучшенными тактико-техническими и эксплуатационными характеристиками. При этом, как и прежде, основное внимание уделяется развитию индукционных переносных средств дистанционного зондирования и диагностики. Необходимость таких работ обусловлена, с одной стороны, развитием новых (композитных) технологий производства, а с другой – широким использованием минно-взрывных устройств (МВУ) с минимальным содержанием металла и отсутствием эффективных средств их обнаружения [1]. Лучшими на сегодня являются зарубежные универсальные индукционные металлоискатели: Garrett Pro (США), Garrett ATX (США), Minelab Excalibur (Австралия), Minex R 4600 («Forster» ФРГ), Mimid («Schiebel» Австрия). Перечисленные индукционные металлоискатели в наибольшей степени пригодны для решения гуманитарных задач как наземной, так и подводной инженерной разведки; имеют близкие тактико-технические характеристики; обнаруживают необходимый набор мишеней на «штатных» дальностях. Отличия состоят в конструкторско-технологических особенностях производства, в обслуживающих опциях и массо-габаритах. При этом общее направление новых разработок – использование композитных материалов с минимальной плотностью и аддитивных 3D технологий. Эти же технологии развиваются и в России [2–5]. В частности, нами разработан и изготовлен ряд индукционных металлоискателей (ПСМ, СИМ-1, СИМ-2) по 3D принтерной технологии методом послойного наплавления PLA пластика с технологическими характеристиками на уровне лучших зарубежных аналогов (например, «Mimid», Австрия).

Конструктивные особенности новых разработок

К прочности, жесткости и герметичности конструктивных элементов перспективного универсального индукционного металлоискателя для наземной и подводной инженерной разведки предъявляются комплексные требования. Конструкция изделия должна обеспечивать его работоспособность и прочность в экстремальных условиях работы на суше и в воде на глубине до 80 м. Для обеспечения данных требований при разработке изделия были использованы результаты оптимизации конструкций на основе цифрового моделирования деформации с учетом физико-механических свойств полимерных композиционных материалов. Оптимизация кинематической схемы изделия выполнена для нормативных эксплуатационных условий, включая подводные работы.

Целью данной работы было определение параметров основных конструктивных элементов универсального индукционного металлоискателя для наземной и подводной инженерной разведки.

Геометрические параметры конструктивных элементов изделия определены с учетом максимальных перемещений и допустимых напряжений для удовлетворения требований прочности применяемых полимерных композиционных материалов.

Исследование и оптимизация конструктивных элементов проведены нами методом трехмерного компьютерного моделирования и параметрического проектирования с использованием специализированных пакетов программ САПР WB ANSYS 17.2 и SolidWorks 2022 SP1.

Использование пакета SolidWorks 2022 SP1 обусловлено сложностью компоновки и наличием подвижных конструктивных элементов изделия, а также необходимостью использования 3D моделей на этапе изготовления макетов с применением 3D печати. Проведены анализ расположения деталей и узлов изделия, а также моделирование перемещений

подвижных частей конструкции. Результаты кинематического моделирования были использованы для коррекции геометрии как узлов и деталей, так и конструкции изделия в целом.

Основными компонентами металлоискателя являются: индукционный датчик, блок электронной обработки сигналов, блок электропитания, коммутационный кабель, телескопическая штанга и блок индикации. В процессе эксплуатации металлоискателя результат обработки сигналов с индукционного датчика выводится оператору в виде звуковой, световой и вибросенсорной индикации.

В конструкции металлоискателя использованы следующие технические решения для отдельных компонентов и сборочных единиц:

– Датчик представляет собой диэлектрическую прямоугольную рамку (245×130) мм с размещенными по периметру излучающей и приемной катушками индуктивности, шарнирно соединяющуюся с нижним концом телескопической штанги. При этом датчик имеет возможность регулировки угла наклона относительно сканируемой поверхности.

– Телескопическая штанга снабжена быстрозажимными эксцентриковыми соединениями для обеспечения быстрого приведения изделия в работу, а также регулировки длины под индивидуальные биометрические показатели оператора [3].

– Коммутационный кабель размещен внутри штанги, при этом имеет герметичные электрические соединения с датчиком и блоком электронной обработки сигналов для обеспечения работоспособности

металлоискателя в условиях наземной и подводной инженерной разведки.

– Блок обработки сигналов вместе с элементами электропитания шарнирно соединён с верхним концом штанги; при этом предусмотрена возможность регулировки угла наклона, вследствие чего конструктивно блок обработки при работе может использоваться в качестве подлокотника и/или переверса для датчика. Конструктивно блок обработки состоит из двух герметизированных диэлектрических контейнеров, в одном из которых находятся кассетные элементы питания, а в другом – электронная управляющая часть. Такое разделение позволяет разместить телескопическую штангу между двух контейнеров, что значительно сокращает габариты изделия в собранном виде.

Для обеспечения способности эксплуатации металлоискателя в условиях глубоководной разведки увеличена жесткость корпусов обоих контейнеров и уменьшены их габаритные размеры.

– Контейнер для кассетных элементов питания имеет герметичную быстроразъемную крышку с эксцентриковым зажимом. Это позволяет при необходимости произвести быструю замену кассеты электропитания.

Геометрические модели устройства

На рис. 1 приведена кинематическая схема универсального индукционного металлоискателя в рабочей и транспортировочной конфигурациях.

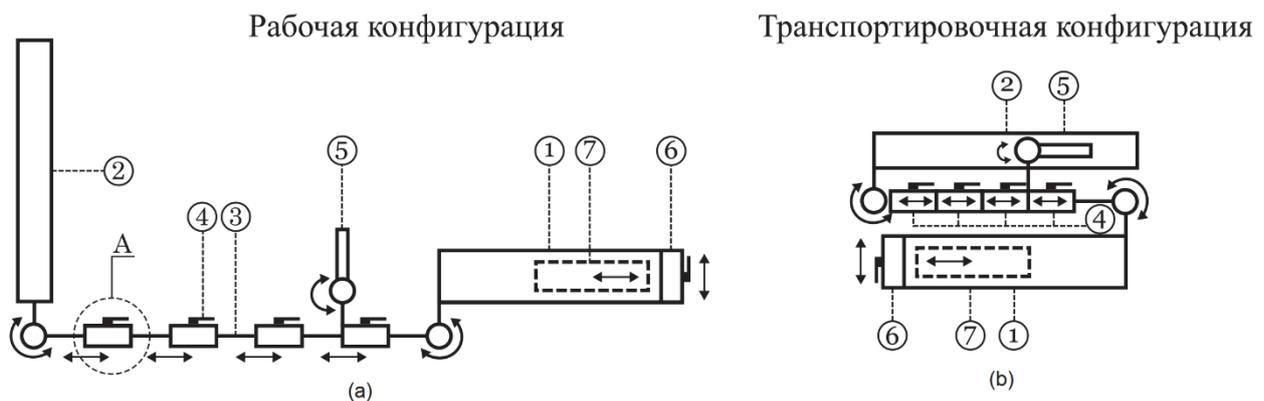


Рис. 1. Кинематическая схема универсального металлоискателя в рабочей конфигурации (а) и в транспортной конфигурации (b): 1 – блок обработки сигналов; 2 – датчик металлоискателя; 3 – телескопическая штанга; 4 – быстрозажимное эксцентриковое соединение; 5 – визуальная индикация; 6 – крышка блока электропитания; 7 – кассетный элемент блока питания

Fig. 1. Kinematic scheme of a universal metal detector in operating configuration (a), in a transport configuration (b): 1 – signal processing unit; 2 – metal detector sensor; 3 – telescopic rod; 4 – quick-clamping eccentric connection; 5 – visual indication; 6 – cover of the power supply unit; 7 – cassette element of the power supply

На основе кинематической схемы с использованием программных средств трехмерного параметрического проектирования САПР была разработана и

исследована геометрическая модель поискового устройства. На рис. 2 приведена геометрическая модель поискового устройства в сложенном виде и в

ления нецелесообразна, поскольку перекрывает доступ к платам для сервисного обслуживания, настройки и ремонту, при этом существенно повышает массу изделия. Заливка компаундом блока питания невозможна, поскольку в процессе эксплуатации предполагается замена кассеты с элементами электропитания; кроме того, блок снабжен съемной крышкой. Коммутационный кабель внутри штанги имеет герметичную защитную оболочку и не нуждается в дополнительной герметизации, защищаются только выводы кабелей в блок обработки сигналов и в блок питания. С противоположной стороны кабель соединяется с приемной и генераторной катушками через гермоввод, при этом сами катушки заливаются эпоксидным компаундом. Аналогичным образом устроена герметизация дисплея визуальной индикации: кабельное соединение вместе с платой с электронными компонентами (включая светодиоды) заливается прозрачным твердеющим компаундом.

Электрическое соединение блока обработки сигналов с блоком электропитания осуществляется через специальную соединительную полость, где расположены усиленные композитной плиткой гермовводы. Сама полость, как и штанга, в процессе работы на глубине может заполняться водой.

Корпуса блоков электропитания и обработки сигналов под действием внешнего давления воды должны испытывать ограниченные деформации, для обеспечения их герметичности. Для геометрической модели блока обработки сигналов (рис. 3) в виде двух частей – торцевой крышки из ABS пластика и отрезка трубы особого профиля с толщиной стенки 1,5 мм из шести слоев углеволоконного тканого материала – было выполнено расчеты деформации. В качестве материала задавалась углеволоконная ткань с плетением и пропиткой из эпоксидной смолы. Механические характеристики ортотропного материала приведены в таблице.

Механические характеристики ортотропного композиционного материала

Плотность, кг/м ³	1420	Предел прочности на растяжение в направлении X, Па	8,1·10 ⁸
Модуль упругости в направлении X, Па	6,1·10 ¹⁰	Предел прочности на растяжение в направлении Y, Па	8,1·10 ⁸
Модуль упругости в направлении Y, Па	6,1·10 ¹⁰	Предел прочности на растяжение в направлении Z, Па	5,0·10 ⁷
Модуль упругости в направлении Z, Па	6,9·10 ⁹	Предел прочности на сдвиг XY, Па	1,25·10 ⁸
Коэффициент Пуассона в плоскости XY	0,04	Предел прочности на сдвиг YZ, Па	6,5·10 ⁷
Коэффициент Пуассона в плоскости YZ	0,3	Предел прочности на сдвиг XZ, Па	6,5·10 ⁷
Коэффициент Пуассона в плоскости XZ	0,3		

В результате проведенного инженерного компьютерного анализа торцевой крышки и многослойных полостных элементов конструкции было определено, что напряженно-деформированное состояние в них под действием внешнего к полости давления равно 0,8 МПа. Контакт между трубой из углепластика и торцевой крышкой полагался жестким вследствие их эпоксидной основы. В результате установлены контуры распределения эквивалентных напряжений и полных деформаций. На глубине погружения ~80 м под давлением воды 0,8 МПа тонкостенная (1,5 мм) труба будет находиться в неоднородном напряженно-деформированном состоянии, как показано на рис. 3. Для данного напряженно-деформированного состояния коэффициент запаса прочности полостных корпусных элементов может варьироваться от 3 до 6 раз в зависимости от механических свойств полимерного композита, достигаемых при разных технологиях производства полимерных композитов (пултрузия, вакуумная формовка, намотка).

Наибольшая концентрация напряжений наблюдается в углах труб. Слои композита на внешней поверхности работают на растяжение, а внутренние – на сжатие.

Учет данного эффекта необходим при моделировании прочности изделий из композитных материалов. Не менее важен учет жесткости самой конструкции. В нашем случае максимальный прогиб стенок корпуса наблюдается в средних частях граней и достигает 0,6 мм, что является недопустимым, так как приводит к касанию с платой электронных компонентов. Интересно в данной конструкции зависимость максимального прогиба от ширины граней. В конструкции профиль трубы – прямоугольник 40×44 мм. Величина максимального прогиба грани шириной 40 мм составляет 0,19 мм на глубине 60 м. Увеличение ширины грани на 10% увеличивает прогиб до 300%. Очевидно, чем меньше ширина граней, тем жестче конструкция. В нашем случае для работы металлоискателя в воде на глубинах до 60 м размеры образующего профиля корпуса из углекомпозита толщиной 1,5 мм не должны превышать 40×40 мм. Именно поэтому принятое техническое решение о разделении герметизированной полости блока обработки сигналов на два контейнера (обработки сигналов и электропитания) является корректно обоснованным и соответствующим требованиям к прочности конструкции.

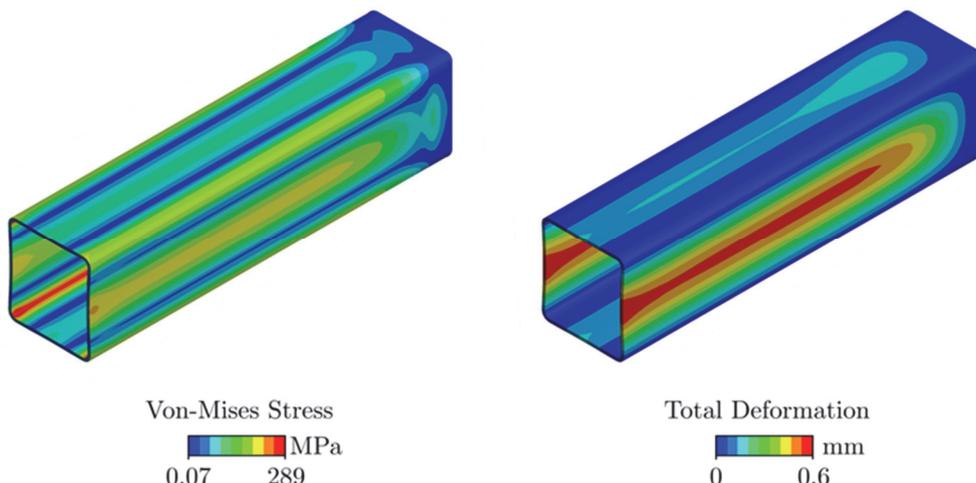


Рис. 3. Распределение эквивалентных напряжений Мизеса и перемещений в стенках полостных элементов из полимерного композита, армированного углеволокном, при внешних давлениях 0,8 МПа

Fig. 3. Distribution of equivalent von Mises stresses and displacements in the walls of cavity elements made of a polymer composite reinforced with carbon fiber at an external pressure of 0.8 MPa

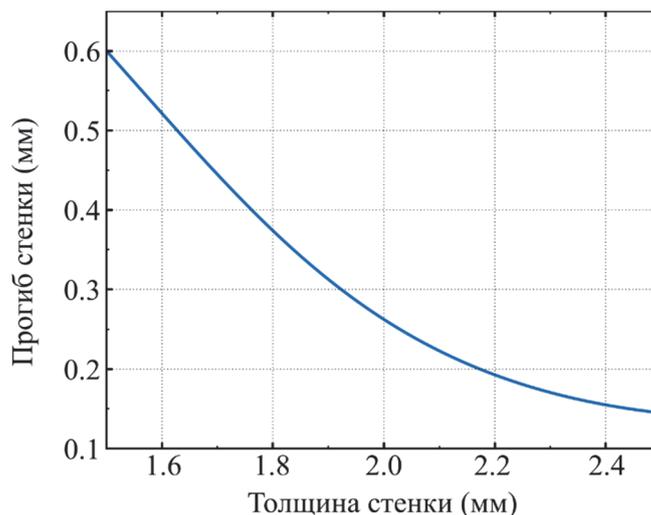


Рис. 4. Зависимость прогиба стенки корпуса блока обработки сигнала от толщины стенки из углеволокноного композита

Fig. 4. Deflection of the wall of the signal processing unit versus the thickness of the of carbon fiber composite wall

В случаях, когда герметизированный блок превышает размеры 40×40 мм, необходимы дополнительные технические решения по усилению конструкции в виде ребер, перегородок, что усложняет технологию, увеличивает массогабариты и снижает эксплуатационные качества изделия. С целью оптимизации параметров конструкции исследована зависимость прогиба стенок блока обработки сигналов от толщины композиционной трубы (количества слоев укладки углеткани с эпоксидным связующим). На рис. 4 представлен график зависимости максимального прогиба корпуса (в центральной части большей грани) от толщины стенки (количества слоев углекомполита).

Из графика видно, что зависимость имеет нелинейный характер. Приемлемое значение прогиба грани в 0,2 мм достигается при её толщине в 2,2 мм, что соответствует 9 слоям многослойного композита на основе эпоксидного связующего, армированного слоями углеткани.

Методом параметрического моделирования исследована степень деформации корпусов блока обработки сигналов и блока электропитания с толщиной стенки 2,25 мм (9 слоев с эпоксидным связующим) в диапазоне измерения внешнего давления воды от 0,2 до 0,8 МПа. На рис. 5 представлен график зависимости прогиба корпуса от внешнего давления морской воды на глубине; зависимость близка к линейной.

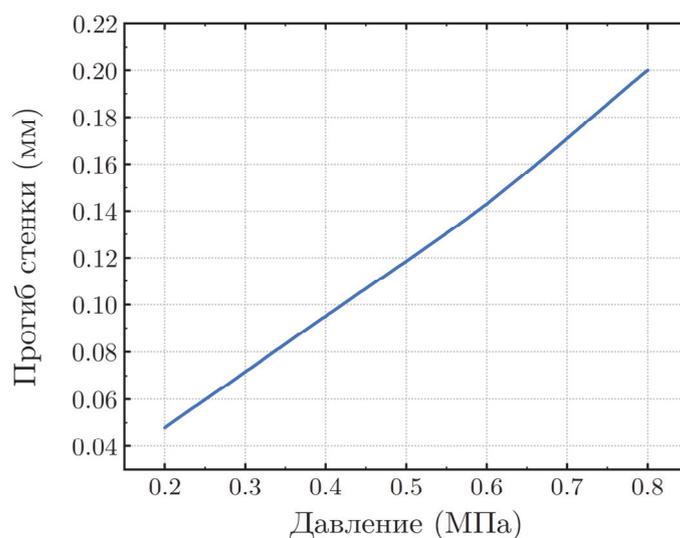


Рис. 5. Зависимость максимального прогиба стенки корпуса от внешнего давления

Fig. 5. Dependence of the maximum deflection of the housing wall versus external pressure

На расчетной глубине 60 м максимальный прогиб стенки составляет 0,14 мм, что является приемлемым при толщине стенки 2,25 мм.

Результаты проведенных исследований являются по существу основой для использования 3D печати композитных элементов универсальных индукционных металлоискателей для экстремальных условий наземной и подводной инженерной разведки.

Заключение

В статье приведены результаты инженерного анализа конструкции универсального индукционного металлоискателя. Показано, что разработанная конструкция удовлетворяет требованиям к прочности и жесткости узлов изделия в условиях всестороннего сжатия на глубине. При этом учитываются физико-механические свойства ортотропного композитного материала и его слоистость. Показано, что для блока

обработки сигналов применение композиционного материала необходимо и технологически оправдано ввиду простой формы деталей. Оптимальная толщина стенок корпуса составляет 2,25 мм (9 слоев углекани толщиной 0,25 мм). В условиях эксплуатационных нагрузок наибольший прогиб имеют средние части граней корпуса, а наиболее напряженные – зоны концентрации напряжений вблизи скруглений, внешние слои композита работают на растяжение, внутренние – на сжатие. Герметичный блок электропитания обладает более сложной формой с ребрами жесткости и большой толщиной стенок материала. Для уменьшения веса блока предложена комбинированная конструкция, состоящая из основной части корпуса из ABS пластика, замка из титана марки BT5-1 и внутренней армированной закладной части из углекомпозита. Конструкция показала работоспособность при испытаниях в реальных эксплуатационных условиях.

Список источников

1. Есипенко В.Н. Радиотехнологии противодействия террористическим угрозам. М.: Радиотехника, 2016. 168 с.
2. Липин А.А. Системы автоматизированного проектирования: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2018. 108 с.
3. Патент № 188894 Российская Федерация. Портативный индукционный металлоискатель / Донченко В.А., Замбалов С.Д., Ивонин И.В., Потекаев А.И., Парватов Г.Н., Светличный В.А., Якубов В.П., Яковлев И.А., Яковлева С.В. № 2018132940; заявл. 18.09.18, опубл. 29.04.19. Бюл. № 13. 8 с.
4. Патент № 168300 Российская Федерация. Пятиугольная телескопическая штанга с быстрозажимным соединением / Донченко В.А., Парватов Г.Н., Потекаев А.И., Светличный В.А., Сынков С.А., Сайфутдинов Р.Х., Яковлев И.А., Яковлева С.В. Замбалов С.Д. № 2016104417; заявл. 10.02.16; опубл. 31.01.17. Бюл. № 4. 19 с.
5. Патент № 189033 Российская Федерация. Универсальный индукционный металлоискатель / Винтоняк Н.П., Донченко В.А., Замбалов С.Д., Ивонин И.В., Потекаев А.И., Парватов Г.Н., Светличный В.А., Якубов В.П., Яковлев И.А., Яковлева С.В. № 2018137833; заявл. 26.10.18, опубл. 07.05.19. Бюл. № 13. 10 с.
6. Беседина К.С., Лавров Н.А., Барсков В.В. Применение аддитивных технологий при получении изделий из полимерных материалов (обзор) // Известия СПбГТИ (ТУ). Химия и технология высокомолекулярных соединений. 2018. № 44. С. 56–63. doi: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.56

References

1. Esipenko, V.N. (2016) *Radiotekhnologii protivodejstviya terroristicheskim ugrozam* [Radio technologies for countering terrorist threats] Moscow : Radiotekhnika.
2. Lipin, A.A. (2018) *Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya: ucheb. posobie* [Computer-aided design systems: textbook]. Ivanovo: Ivanovo State University of Chemistry and Technology.
3. Donchenko, V.A., Zambalov, S.D., Ivonin, I.V., Potekaev, A.I., Parvatov, G.N., Svetlichny, V.A., Yakubov, V.P., Yakovlev, I.A. & Yakovleva, S.V. (2019) *Portativnyj indukcionnyj metalloiskatel'* [Portable induction metal detector] Patent No. 188894 Russian Federation. № 2018132940, appl. 18.09.18, publication date 29.04.19, Bul. No. 13.
4. Donchenko, V.A., Parvatov, G.N., Potekaev, A.I., Svetlichny, V.A., Synkov, S.A., Sayfutdinov, R.Kh., Zambalov, S.D., Yakovlev, I.A. & Yakovleva, S.V. (2017) *Pyatiugol'naya teleskopicheskaya shtanga s bystrozazhimnym soedineniem* [Pentagonal telescopic rod with quick-release connection] Patent No. 168300 Russian Federation. № 2016104417; appl. 02.10.16, publication date 31.01.17, Bul. No. 4.
5. Vintonyak, N.P., Donchenko, V.A., Zambalov, S.D., Ivonin, I.V., Potekaev, A.I., Parvatov, G.N., Svetlichny, V.A., Yakubov, V.P., Yakovlev, I.A. & Yakovleva, S.V. (2019) *Universal'nyj indukcionnyj metalloiskatel'* [Universal induction metal detector] Patent No. 189033 Russian Federation. № 2018137833; appl. 26.10.18, publication date 07.05.19, Bul. No. 13.
6. Besedina, K.S., Lavrov, N.A. & Barskov, V.V. (2018) Application of additive technologies in production of articles from polymeric materials (review). *Izvestia SPbGTI (TU) Chemistry and technology of macromolecular compounds*. 44. pp. 56–63. (In Russian). doi: 10.15217/issn1998984-9.2018.44.56

Информация об авторах:

Ворожцов Александр Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: abv@mail.tomsknet.ru

Парватов Георгий Николаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: georgpa@yandex.ru

Замбалов Сергей Доржиевич – кандидат физико-математических наук, лаборант Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: zambalovsd@gmail.com

Донченко Валерий Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: don@spti.tsu.ru

Скрипняк Владимир Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: skrp2012@yandex.ru

Клоков Андрей Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kav@mail.tsu.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Vorozhtsov Alexander B., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of laboratory, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: abv@mail.tomsknet.ru

Parvatov Georgiy N., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: georgpa@yandex.ru

Zambalov Sergey D., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Laboratory Assistant, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zambalovsd@gmail.com

Donchenko Valery A., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: don@spti.tsu.ru

Skripnyak Vladimir V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: skrp2012@yandex.ru

Klokov Andrey V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kav@mail.tsu.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 26.04.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 26.04.2024; accepted for publication 30.10.2024

Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ

Научная статья

УДК 662.2

doi: 10.17223/29491665/6/3

Получение и анализ характеристик вязкой пасты nAl/HTPB для высокоэнергетических материалов

Сергей Дмитриевич Соколов¹, Александр Борисович Ворожцов²,
Николай Григорьевич Родкевич³, Марат Израильевич Лернер⁴

^{1, 2, 4} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, Бийск, Россия*

^{3, 4} *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

¹ *sokolovsd95@yandex.ru*

² *abv@mail.tomsknet.ru*

³ *ngradk@ispms.tsc.ru*

⁴ *lerner@ispms.tsc.ru*

Аннотация. Представлены экспериментальные исследования вязкой высокоэнергетической смеси (пасты), состоящей из наноразмерного алюминиевого порошка (nAl) и полибутадиена с концевыми гидроксильными группами (HTPB). Пастообразная композиция (nAl/HTPB) может быть использована как промежуточный продукт для последующего производства высокоэнергетических материалов (ВЭМ) на её основе, сохраняя при этом свойства и преимущества nAl.

Ключевые слова: полибутадиен с концевыми гидроксильными группами (HTPB), наноалюминий (nAl), вязкость, высокоэнергетические материалы

Благодарности: исследование синтеза нанопорошка алюминия и паст на его основе выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-79-30006), <https://rscf.ru/en/project/21-79-30006/>. Исследование структуры, термогравиметрического анализа и вязкости паст проводилось при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Соколов С.Д., Ворожцов А.Б., Родкевич Н.Г., Лернер М.И. Получение и анализ характеристик вязкой пасты nAl / HTPB для высокоэнергетических материалов // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 23–31. doi: 10.17223/29491665/6/3

Original article

doi: 10.17223/29491665/6/3

Preparation and performance analysis of viscous nAl/HTPB paste for high-energy materials

Sergei D. Sokolov¹, Alexander B. Vorozhtsov², Nikolay G. Rodkevich³, Marat I. Lerner⁴

^{1, 2, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Biysk, Russian Federation*

^{3, 4} *Institute of Physics Strength and Material Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation*

¹ *sokolovsd95@yandex.ru*

² *abv@mail.tomsknet.ru*

³ *ngradk@ispms.tsc.ru*

⁴ *lerner@ispms.tsc.ru*

Abstract. This study involves experimental investigations on a viscous high-energy mixture (paste) composed of nanoscale aluminum powder (nAl) and polybutadiene with terminal hydroxyl groups (HTPB). The paste-like composition (nAl/HTPB) can be employed as an intermediate product for the subsequent production of high-energy materials (HEMs) derived from it, while maintaining the properties and advantages of nAl.

Keywords: HTPB, nAl, viscosity, high-energy materials

Acknowledgments: The synthesis of aluminum nanopowder and pastes based on it were performed with the financial support of Russian Science Foundation grant (project No. 21-79-30006), <https://rscf.ru/en/project/21-79-30006/>. The study of structure, thermogravimetric analysis and viscosity of pastes was conducted with the support of the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Sokolov, S.D., Vorozhtsov, A.B., Rodkevich, N.G. & Lerner, M.I. (2024) Preparation and performance analysis of viscous nAl/HTPB paste for high-energy materials // *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 23–31. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/3

Введение

Мировое научное сообщество проявляет интерес к нанотехнологиям, особенно к нанопорошкам металлов и неметаллов, что подтверждается большим количеством исследований по этой теме [1–5]. Интерес связан с тем, что нанопорошок в отличие от порошка микронного размера демонстрирует существенно другие физико-химические, энергетические, электрические, оптические свойства и другие свойства: повышенная реакционная способность; большая площадь удельной поверхности; квантовые эффекты; магнитные и фото свойства и другое.

Порошок алюминия (Al) является доступным, эффективным и широко изученным металлическим горючим в различных составах высокоэнергетических материалов (ВЭМ). Замена алюминия микронного размера (μAl) на нанопорошок (nAl) приводит к увеличению скорости горения, уменьшению размера конденсированных продуктов сгорания и задержек воспламенения [6]. Благодаря повышенной реакционной способности нанопорошок является перспективным металлическим наполнителем составов ВЭМ [1, 7–13]. В работе [6] описано влияние размера частиц Al на скорость горения и образование конденсированных продуктов сгорания. Показано, что замена порошка μAl на nAl приводит к увеличению скорости горения почти в 2 раза.

Несмотря на очевидные преимущества nAl в составах ВЭМ (например, более высокая скорость реакции) существуют недостатки. Один из таких недостатков заключается в равномерном распределении нанопорошка в среде полимерного связующего [1, 2]. При смешивании нанопорошка и полимера вязкость смеси возрастает в десятки раз, несколько снижаясь при продолжении смешения. Снижение вязкости обусловлено разрушением агломератов наночастиц и более равномерным распределением наночастиц металла в объеме полимерного связующего. Высокая вязкость смеси требует большего времени на смешение и больших затрат энергии на процесс. Для решения этого недостатка важной технологической стадией является предварительное получение вязких паст, состоящих из нанопорошков металлов и полимерных связующих.

В качестве материала для получения паст предложен низкомолекулярный полибутадиен с концевыми гидроксильными группами (HTPB). Полимер HTPB широко изучен и является одним из наиболее часто используемых связующих в составах ВЭМ [14, 15] из-за его низкой температуры стеклования, малой вязкости, высокой теплоты сгорания и, после отверждения, высокими механическими свойствами конечного продукта даже при высоких коэффициентах наполнения порошком.

Таким образом, целью работы является получение и экспериментальное исследование характеристик вязкой пастообразной композиции nAl/HTPB с различной концентрацией HTPB для применения в составах ВЭМ.

Материалы и методы

Синтез нанопорошка алюминия осуществлялся методом электрического взрыва проволоки (ЭВП). Методика получения подробно описана в работе [16]. Микроструктуру алюминия и паст на его основе изучали на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100 CXII (ТЕМ, JEOL Ltd., Токио, Япония). Содержание активного алюминия (S_{Al}) определяли объемным методом по выделению водорода при реакции порошка с 5 масс.% NaOH [17].

Удельную поверхность определяли по адсорбции / десорбции азота методом Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) на анализаторе удельной поверхности дисперсных и пористых материалов СОРБОМЕТР-М («Катокон», Россия). Перед измерением удельной поверхности образцы массой 50 мг нагревали при температуре 120°C в течение 30 мин. Средний диаметр частиц был рассчитан в предположении, что распределение частиц по размерам состоит из однородных:

$$d = \frac{6000}{\rho S}, \quad (1)$$

где d – диаметр наночастиц, нм; ρ – плотность частиц, г/см³; S – площадь удельной поверхности, м²/г [18].

Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили на приборе Seiko Exstar 6000 (Seiko Instruments Inc., Chiba, Japan). Образцы массой 5–10 мг нагревали от 25 до 1000°C при скорости нагрева 10°C/мин в атмосфере воздуха и аргона.

Измерение вязкости паст nAl/НТРВ проводилось на ротационном вискозиметре Rheotest 2.1. Паста (18 мл) помещалась в измерительную ячейку вискозиметра, в кольцевой зазор между вращающимся внутренним цилиндром и неподвижным наружным цилиндром. Измерение проводилось при установившемся течении при различных сдвиговых напряжениях. Для снижения вязкости смеси при приготовлении паст использовались растворители, рекомендованные изготовителями полимеров. Для НТРВ в качестве растворителя использовался петролейный эфир 70/100.

Получение паст nAl/НТРВ. Для приготовления паст nAl/НТРВ, например, с содержанием НТРВ 10 масс.% (nAl-H10), использовали 250 мл растворителя, 45,0 г (nAl) и 0,225 г ацетилацетона. Количество ацетилацетона составляло 0,5 масс.% от массы нанопорошка. Полученную смесь перемешивали на смесителе с высоким сдвигающим моментом HG-15D (Daihan Scientific, Сеул, Корея) при скорости вращения смесителя 5 000 об/мин в течение 30 мин. Затем к смеси добавили раствор на основе НТРВ (5,0 г НТРВ в 50 мл растворителя) и перемешивали еще 30 мин. Растворитель удаляли из смеси с помощью роторного испарителя ИКА 10 RV (ИКА®-Werke GmbH & Co. KG, Штауфен-им-Брайсгау, Германия), полученный продукт сушили при давлении 1 Торр (133,32 Па) в течение 16 ч. Образцы для исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1
Экспериментальные образцы

Образец	Компонентный состав	Примечание
nAl	nAl (Al, Al ₂ O ₃)	Исходный порошок, пассивированный воздухом, 100 нм (номинальный размер)
nAl-H10	nAl (90 масс.%) + НТРВ (10 масс.%)	Ацетилацетон: 0,5 масс.% от массы nAl
nAl-H20	nAl (80 масс.%) + НТРВ (20 масс.%)	

Работа проводилась с применением оборудования Томского регионального центра коллективного пользования (Work was conducted with the application of equipment of the Tomsk Regional Core Shared Research Facilities Centre of National Research Tomsk State University).

Результаты и обсуждение

Изображение нанопорошка алюминия, полученное с помощью просвечивающей электронной микро-

скопии, представлено на рис. 1. Наночастицы преимущественно имеют сферическую форму с природным аморфным оксидным слоем [12]. Наблюдается выраженная склонность к агрегации (рис. 1, b) с образованием частиц, подверженных холодной коагуляции. Размеры агрегатов достигают 3–5 мкм. Наблюдаемые агрегаты довольно компактны, однако взаимодействия частиц, обусловленные холодной коагуляцией, обычно относительно слабы, и агрегаты могут быть разрушены (хотя и обратимо) при механических воздействиях (например, ультразвуковом облучении). Показано, что распределение частиц по размерам имеет правостороннюю асимметрию и близко к логарифмически нормальному закону распределения (рис. 1, c).

В табл. 2 приведены экспериментальные и ожидаемые значения содержания активного алюминия (S_{Al}) для исследуемых образцов. Для nAl/НТРВ экспериментальное значение S_{Al} сравнивается с ожидаемым, полученным из nAl и номинальной массовой доли покрытия (10 и 20 масс.%). Содержание активного алюминия для исследуемых образцов составляет $\sim 85,9 \pm 0,8$ масс.% для nAl, $\sim 74,7 \pm 0,5$ масс.% – nAl-H10 и $\sim 63,4 \pm 2,8$ масс.% – nAl-H20. Разница между экспериментальными и ожидаемыми значениями объясняется присутствием (незначительного количества) остаточного растворителя в пастах, содержащих НТРВ. С этой точки зрения данное наблюдение подтверждается немного более высокой разницей S_{Al} для nAl-H20, которая содержит более высокую массовую долю НТРВ. Удельная поверхность нанопорошка $S_{уд} = 28,0 \text{ м}^2/\text{г}$.

Общий вид паст nAl/НТРВ представлен на рис. 2, где видно, что НТРВ образует непрерывный органический слой, частично сорбированный на поверхности наночастиц или кластеров частиц. Как видно из приведенных данных, смешение по приведенной методике протекает достаточно эффективно. Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют об отсутствии реакций порошок–полимер, модифицирующих состав порошка: в процессе приготовления образца не происходит ни образования растворимых соединений алюминия при взаимодействии с органическими веществами, ни сорбции растворителя частицами образца. Осаждение НТРВ на поверхность частиц создает защитный слой, экранирующий поверхность наночастиц от взаимодействия с окружающей средой, что обеспечивает повышенную устойчивость к старению [19]. В то же время осаждение НТРВ способствует кластеризации частиц, где разрозненные частицы заключены в слой НТРВ [19], однако влияние этого эффекта следует оценивать с учетом перемешивания и диспергирования порошка в составе ВЭМ.

ТГА-кривые образцов НТРВ и nAl/НТРВ в атмосфере аргона показаны на рис. 3. Видно, что исходный НТРВ подвергается двухстадийному разложению. Первая стадия начинается при температуре ~225°C и продолжается до температуры ~325°C с по-

терей массы ~11%. Вторая стадия разложения протекает в диапазоне температур от 325 до 525°C с практически полной потерей массы. Скорость разложения на второй стадии, судя по наклону кривой ТГА, выше, чем на первой.

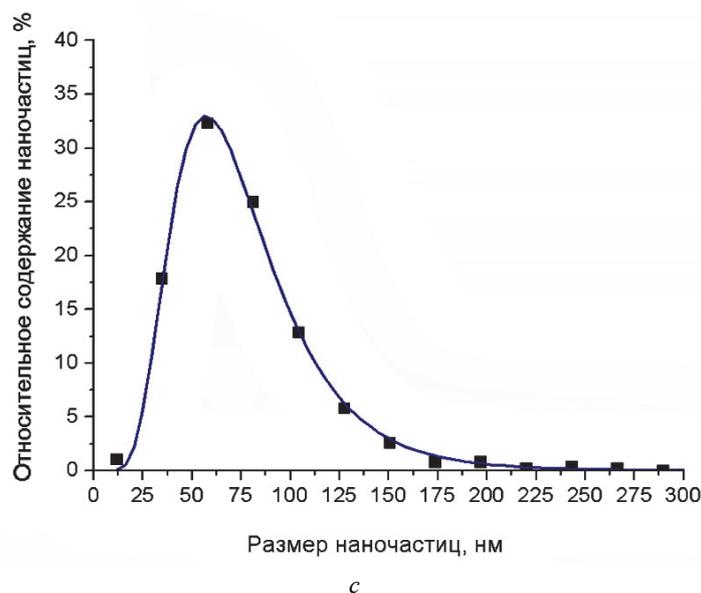
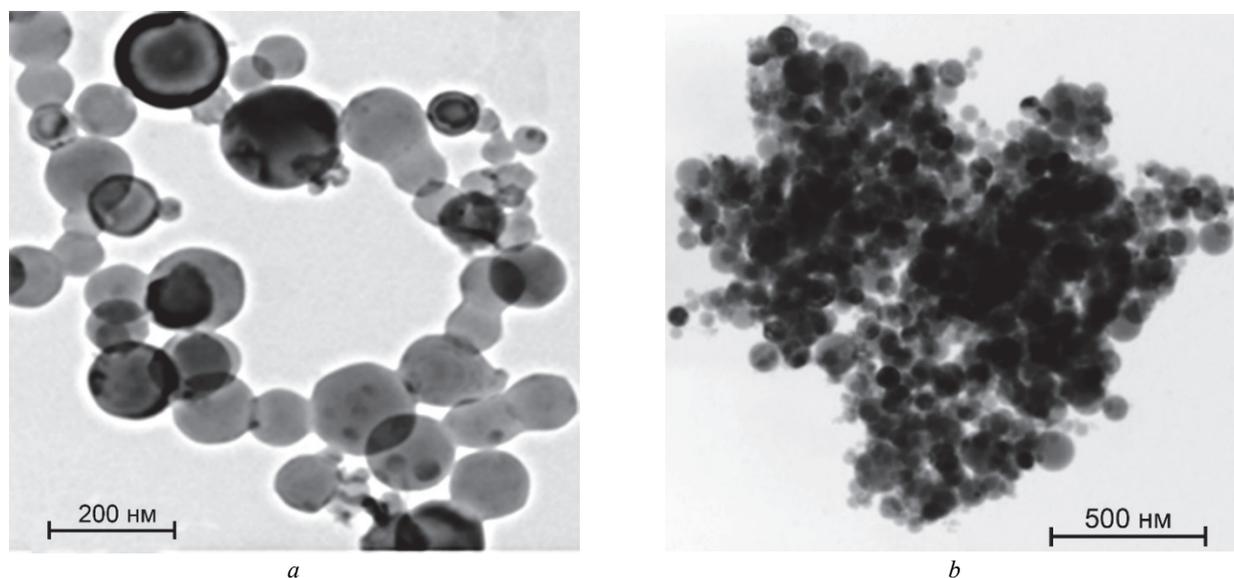


Рис. 1. ПЭМ-изображение и дисперсность: *a* – исходные наночастицы алюминия; *b* – агломерат наночастиц алюминия; *c* – распределение частиц по размерам

Fig. 1. TEM-image and dispersity: *a* – pristine aluminum nanoparticles; *b* – aluminum nanoparticle cluster; *c* – particle size distribution

Таблица 2

Содержание активного алюминия в исследуемых материалах

Образец	C_{Al} экспериментальное, масс.%	C_{Al} ожидаемое, масс.%
nAl	$85,9 \pm 0,8$	-
nAl-H10	$74,7 \pm 0,5$	77,3
nAl-H20	$63,4 \pm 2,8$	68,7

Примечание. Ожидаемое содержание алюминия оценивается по показателю nAl100.

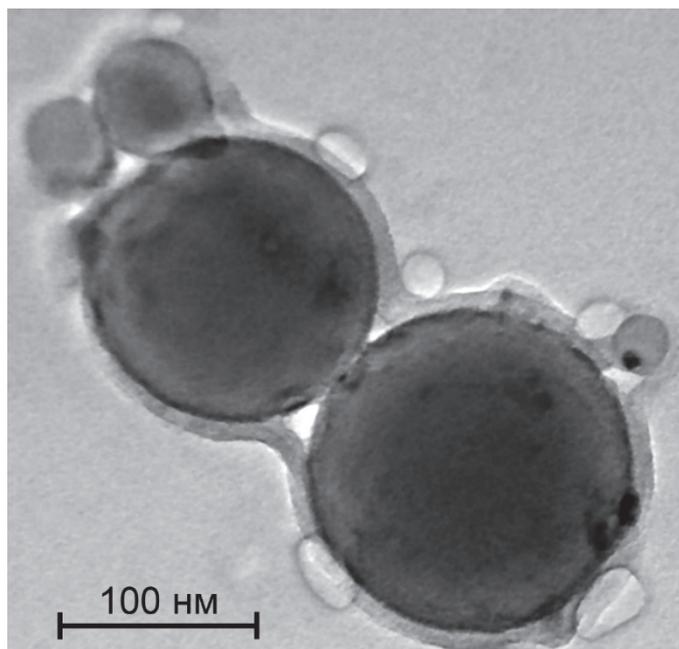


Рис. 2. Алюминиевые наночастицы, покрытые НТРВ

Fig. 2. Aluminum nanoparticles coated with HTPB

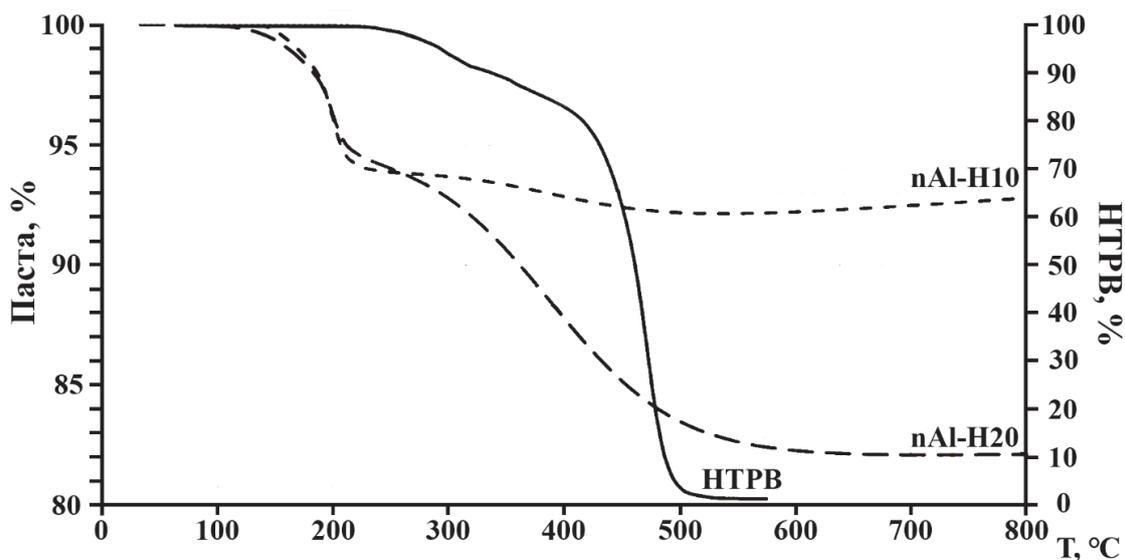


Рис. 3. ТГА-кривые образцов в атмосфере аргона

Fig. 3. TGA-curves of samples in argon atmosphere

Термическое разложение в пастах nAl/HTPB также проходит в два этапа. Однако первая стадия начинается при более низкой температуре $\sim 100^\circ\text{C}$ и заканчивается при температуре $\sim 210^\circ\text{C}$. Потеря массы на этой стадии составляет 7–8% и не зависит от состава пасты. Можно предположить, что разложение полимера происходит на поверхности наночастиц, а их поверхностный оксидный слой является катализатором.

Термическое разложение НТРВ на второй стадии протекает с меньшей скоростью по сравнению с первой стадией, хотя и при более высокой температуре.

Окончание разложения происходит в интервале от 500 до 550°C , что говорит о том, что пиролиз полимера на этой стадии протекает вне его контакта с оксидом алюминия, механизм разложения полимера не меняется, при этом скорость ниже из-за более низкой температуры начала разложения.

ТГА-кривые образцов НТРВ и nAl-НТРВ в атмосфере воздуха показаны на рис. 4. Исходный НТРВ, как видно из ТГА-кривой, претерпевает двухстадийную потерю массы, как и при испытаниях в атмосфере аргона (рис. 4).

Потеря массы на первой стадии разложения незначительно выше по сравнению с экспериментом в атмосфере аргона. Первая стадия разложения начинается при температуре $\sim 200^\circ\text{C}$ и продолжается до температуры $\sim 380^\circ\text{C}$, потеря массы на этой стадии составляет $\sim 7\%$. Вторая стадия протекает в диапазоне температур от 380 до 475°C с почти полной потерей массы. Скорость разложения НТРВ на этой стадии, судя по наклону ТГА-кривой, значительно выше, чем на первой стадии.

Разложение НТРВ, нанесенного на поверхность $n\text{Al}$, протекает, как и в случае с аргоном, в две стадии, однако первая стадия разложения начинается при более низкой температуре $\sim 100^\circ\text{C}$ и заканчивается при

температуре $\sim 200^\circ\text{C}$. Потеря массы на этой стадии зависит от состава пасты, причем потеря массы больше при увеличении содержания НТРВ. Выше 200°C начинается вторая стадия, которая завершается при температуре около $\sim 500^\circ\text{C}$.

При температуре выше 500°C начинается окисление наночастиц алюминия. В интервале температур $550\text{--}650^\circ\text{C}$ наблюдается окисление наночастиц алюминия, сопровождающееся их частичным спеканием [20].

Последующее окисление алюминия наблюдается при температуре выше 650°C и продолжается при температуре выше 1000°C .

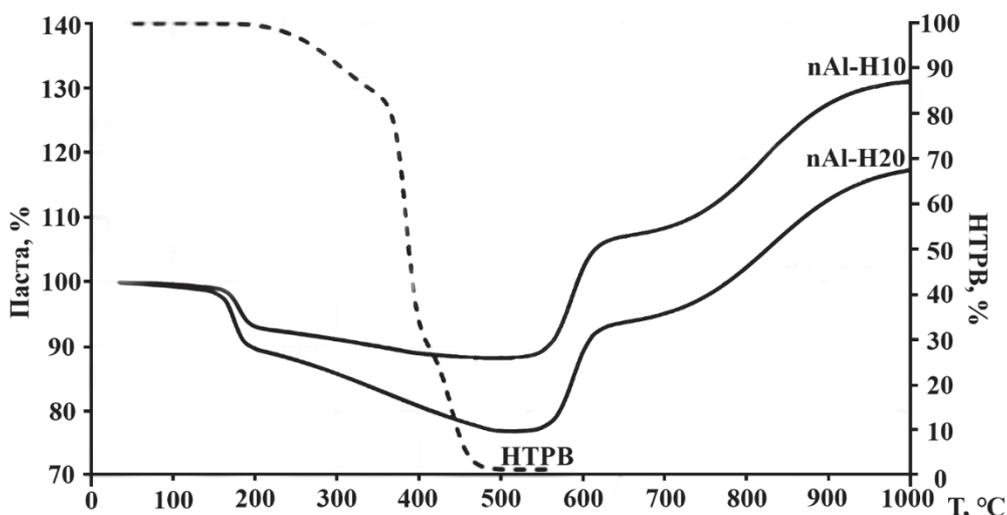


Рис. 4. ТГА-кривые образцов в атмосфере воздуха

Fig. 4. TGA-curves of samples in air atmosphere

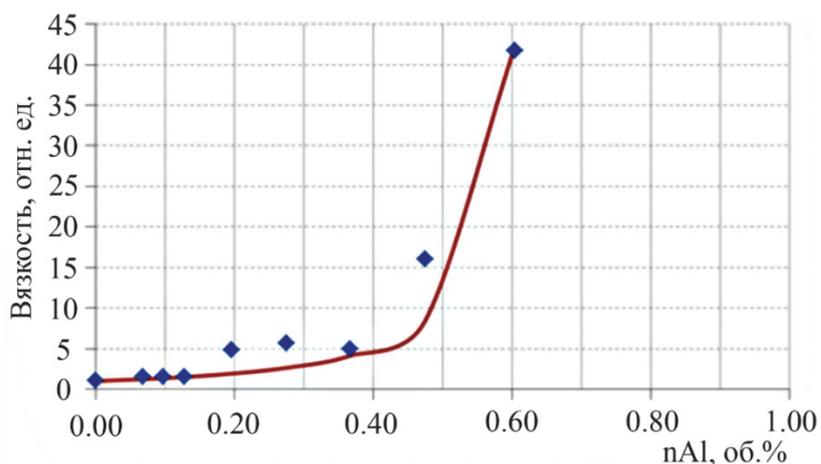


Рис. 5. Вязкость пасты $n\text{Al}/\text{HTPB}$

Fig. 5. $n\text{Al}/\text{HTPB}$ paste viscosity

Паста демонстрирует псевдопластичное течение, для которого характерно снижение вязкости при увеличении скорости сдвига, для расчетов брались величины вязкости при скорости сдвига 1 c^{-1} .

При введении нанопорошка металла в полимер или раствор полимера вязкость значительно возрастает. Зависимость вязкости от степени наполнения смеси имеет вид (2):

$$\eta_r = (1 - \Phi)^{0,3\Phi-2}, \quad (2)$$

где η_r – относительная вязкость смеси; Φ – приведенная объемная доля наночастиц в смеси, $\Phi = \frac{\varphi}{\varphi_m}$, φ – объемная доля наночастиц в смеси, φ_m – предельное наполнение смеси наночастицами. Предельное наполнение смеси наночастицами – это такое наполнение, выше которого смесь теряет текучесть.

На рис. 5 приведен график зависимости вязкости смеси от объемной доли наночастиц. Как следует из приведенных данных, вязкость смеси резко возрастает после достижения объемной доли наночастиц 0,4 (примерно 70 масс. % nAl). Величина предельного наполнения φ_m для пасты равна 0,68.

Заключение

В процессе исследования были приготовлены вязкие пасты nAl/НТРВ методом мокрого смешивания с содержанием НТРВ, равным 10 и 20 масс. %.

Установлено, что нанопорошок алюминия, полученный методом ЭВП, имеет сферическую форму с аморфным оксидным слоем и площадь удельной по-

верхности, равную $S_{уд} = 28,0 \text{ м}^2/\text{г}$. Порошок представлен агломератами размером от 3 до 5 мкм. Показано, что содержание активного алюминия для исследуемых образцов составило $\sim 85,9 \pm 0,8$ масс. % для nAl, $\sim 74,7 \pm 0,5$ масс. % – для nAl-H10 и $\sim 63,4 \pm 2,8$ масс. % – для nAl-H20.

Обнаружено, что пасты nAl/НТРВ покрыты непрерывным органическим слоем НТРВ, частично сорбированным на поверхности наночастиц алюминия или / и их кластеров.

Показано, что вязкость пасты существенно возрастает после введения 0,4 об. % nAl (примерно 70 масс. % nAl). Величина предельного наполнения φ_m для пасты равна 0,68.

Вязкие пасты на основе nAl/НТРВ могут быть промежуточным продуктом для последующего производства смешанных высокоэнергетических материалов, сохраняя при этом качество и преимущества nAl.

Покрытие поверхности наночастиц НТРВ защищает их от воздействия окружающей среды (т.е. от разрушения материала в результате старения) и обеспечивает более легкое обращение и производство.

Список источников

1. Dreizin E.L. Metal-based reactive nanomaterials // Progress in energy and combustion science. 2009. Vol. 35, № 2. P. 141–167. doi: 10.1016/j.pecc.2008.09.001
2. Sundaram D., Yang V., Yetter R. Metal-based nanoenergetic materials: synthesis, properties, and applications // Progress in Energy and Combustion Science. 2017. Vol. 61. P. 293–365. doi: 10.1016/j.pecc.2017.02.002
3. Kudryashova O.B., Lerner M.I., Vorozhtsov A.B., Sokolov S.D., Promakhov V.V. Review of the Problems of Additive Manufacturing of Nanostructured High-Energy Materials // Materials. 2021. Vol. 14, № 23. Art. No. 7394. doi: 10.3390/ma14237394
4. Pang W., Li Y., DeLuca L.T., Liang D., Qin Z., Liu X., Xu H., Fan X. Effect of Metal Nanopowders on the Performance of Solid Rocket Propellants: A Review // Nanomaterials. 2021. Vol. 11, № 10. Art. No. 2749. doi: 10.3390/nano11102749
5. Maduray K., Parboosing R. Metal nanoparticles: a promising treatment for viral and arboviral infections // Biological Trace Element Research. 2021. Vol. 199, № 8. P. 3159–3176. doi: 10.1007/s12011-020-02414-2
6. Sakovich G.V., Arkhipov V.A., Vorozhtsov A.B., Bondarchuk S.S., Pevchenko B.V. Investigation of combustion of HEM with aluminum nanopowders // Nanotechnologies in Russia. 2010. Vol. 5, № 1–2. P. 91–107. doi: 10.1134/S1995078010010106
7. Young G., Wang H., Zachariah M. Application of Nano-Aluminum/Nitrocellulose Mesoparticles in Composite Solid Rocket Propellants // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2015. Vol. 40, № 3. P. 413–418. doi: 10.1002/prop.201500020
8. DeLuca L.T., Galfetti L., Severini F., Meda L., Marra G., Vorozhtsov A.B., Sedoi V.S., Babuk V.A. Burning of nano-aluminized composite rocket propellants // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2005. Vol. 41, № 6. P. 680–692. doi: 10.1007/s10573-005-0080-5
9. Pang W.Q., DeLuca L.T., Huixiang X., Xuezhong F., Fengqi Z., Fangli L., Wuxi X., Yonghong L. Effects of nano-metric aluminum powder on the properties of composite solid propellants // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2015. Vol. 14, № 4. P. 265–282. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2015012095
10. Ivanov Y.F., Osmonoliev M.N., Sedoi V.S., Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Vorozhtsov A.B., Kuznetsov V.T. Productions of ultra-fine powders and their use in high energetic compositions // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2003. Vol. 28, № 6. P. 319–333. doi: 10.1002/prop.200300019
11. Vorozhtsov A.B., Rodkevich N.G., Lerner M.I., Zhukov A.S., Bondarchuk S.S., Dyachenko N.N. Metal nanoparticles in high-energetic materials practice // International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion. 2017. Vol. 16, № 3. P. 231–241. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2018025003
12. Vorozhtsov A.B., Lerner M., Rodkevich N., Nie H., Abraham A., Schoenitz M., Dreizin E.L. Oxidation of nano-sized aluminum powders // Thermochimica Acta. 2016. Vol. 636. P. 48–56. doi: 10.1016/j.tca.2016.05.003
13. Ju Z.Y., An J.L., Guo C.Y., Li T.R., Jia Z.Y., Wu R.F. The oxidation reaction and sensitivity of aluminum nanopowders coated by hydroxyl-terminated polybutadiene // Journal of Energetic Materials. 2021. Vol. 39, № 3. P. 299–312. doi: 10.1080/07370652.2020.1792584
14. Lu Y.C., Kuo K.K. Thermal decomposition study of hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) solid fuel // Thermochimica acta. 1996. Vol. 275, № 2. P. 181–191. doi: 10.1016/0040-6031(95)02726-2
15. Vorozhtsov A.B., DeLuca L.T., Reina A., Lerner M.I., Rodkevich N.G. Effects of HTPB-coating on nano-sized aluminum in solid rocket propellant performance // Science and Technology of Energetic Materials. 2015. Vol. 76. P. 105–109.

16. Lerner M.I., Glazkova E.A., Lozhkomoev A.S., Svarovskaya N.V., Bakina O.V., Pervikov A.V., Psakhie S.G. Synthesis of Al nanoparticles and Al/AlN composite nanoparticles by electrical explosion of aluminum wires in argon and nitrogen // *Powder Technology*. 2016. Vol. 295. P. 307–314. doi: 10.1016/j.powtec.2016.04.005
17. Chen L., Song W., Lv J., Chen X., Xie C. Research on the methods to determine metallic aluminum content in aluminum nanoparticles // *Materials Chemistry and Physics*. 2010. Vol. 120. P. 670–675. doi: 10.1016/j.matchemphys.2009.12.030
18. Kuśnieruk S., Wojnarowicz J., Chodara A., Chudoba T., Gierlotka S., Lojkowski W. Influence of hydrothermal synthesis parameters on the properties of hydroxyapatite nanoparticles // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2016. Vol. 7. P. 1586–1601. doi: 10.3762/bjnano.7.153
19. Pang W., DeLuca L.T., Wang K., Fu X., Li J., Xu H., Li H. Performance of Composite Solid Propellant Containing Nanosized Metal Particles // *Nanomaterials in Rocket Propulsion Systems*. 2019. P. 263–298. doi: 10.1016/B978-0-12-813908-0.00007-1
20. Lozhkomoev A.S., Rodkevich N.G., Vorozhtsov A.B., Lerner M.I. Oxidation and oxidation products of encapsulated aluminum nanopowders // *Journal of Nanoparticle Research*. 2020. Vol. 22. P. 1–13. doi: 10.1007/s11051-019-4748-2

References

7. Dreizin, E.L. (2009) Metal-based reactive nanomaterials. *Progress in energy and combustion science*. 35 (2). pp. 141–167. doi: 10.1016/j.peccs.2008.09.001
8. Sundaram, D., Yang, V. & Yetter, R. (2017) Metal-based nanoenergetic materials: synthesis, properties, and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 61. pp. 293–365. doi: 10.1016/j.peccs.2017.02.002
9. Kudryashova, O.B., Lerner, M.I., Vorozhtsov, A.B., Sokolov, S.D. & Promakhov, V.V. (2021) Review of the Problems of Additive Manufacturing of Nanostructured High-Energy Materials. *Materials*. 14 (23). Art. No. 7394. doi: 10.3390/ma14237394
10. Pang, W., Li, Y., DeLuca, L.T., Liang, D., Qin, Z., Liu, X., Xu, H. & Fan, X. (2021) Effect of Metal Nanopowders on the Performance of Solid Rocket Propellants: A Review. *Nanomaterials*. 11 (10). Art. No. 2749. doi: 10.3390/nano11102749
11. Maduray, K. & Parboosing, R. (2021) Metal nanoparticles: a promising treatment for viral and arboviral infections. *Biological Trace Element Research*. 199 (8). pp. 3159–3176. doi: 10.1007/s12011-020-02414-2
12. Sakovich, G.V., Arkhipov, V.A., Vorozhtsov, A.B., Bondarchuk, S.S. & Pevchenko, B.V. (2010) Investigation of combustion of HEM with aluminum nanopowders. *Nanotechnologies in Russia*. 5 (1–2). pp. 91–107. doi: 10.1134/S1995078010010106
13. Young, G., Wang, H. & Zachariah, M. (2015) Application of Nano-Aluminum/Nitrocellulose Mesoparticles in Composite Solid Rocket Propellants. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 40 (3). pp. 413–418. doi: 10.1002/prep.201500020
14. DeLuca, L.T., Galfetti, L., Severini, F., Meda, L., Marra, G., Vorozhtsov, A.B., Sedoi, V.S. & Babuk, V.A. (2005) Burning of nano-aluminized composite rocket propellants. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 41 (6). pp. 680–692. doi: 10.1007/s10573-005-0080-5
15. Pang, W.Q., Deluca, L.T., Huixiang, X., Xuezhong, F., Fengqi, Z., Fangli, L., Wuxi, X. & Yonghong, L. (2015) Effects of nanometric aluminum powder on the properties of composite solid propellants. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 14 (4). pp. 265–282. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2015012095
16. Ivanov, Y.F., Osmonoliev, M.N., Sedoi, V.S., Arkhipov, V.A., Bondarchuk, S.S., Vorozhtsov, A.B. & Kuznetsov, V.T. (2003) Productions of ultra-fine powders and their use in high energetic compositions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 28 (6). pp. 319–333. doi: 10.1002/prep.200300019
17. Vorozhtsov, A.B., Rodkevich, N.G., Lerner, M.I., Zhukov, A.S., Bondarchuk, S.S. & Dyachenko, N.N. (2017) Metal nanoparticles in high-energetic materials practice. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*. 16 (3). pp. 231–241. doi: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2018025003
18. Vorozhtsov, A.B., Lerner, M., Rodkevich, N., Nie, H., Abraham, A., Schoenitz, M. & Dreizin, E.L. (2016) Oxidation of nano-sized aluminum powders. *Thermochimica Acta*. 636. pp. 48–56. doi: 10.1016/j.tca.2016.05.003
19. Ju, Z.Y., An, J.L., Guo, C.Y., Li, T.R., Jia, Z.Y. & Wu, R.F. (2021) The oxidation reaction and sensitivity of aluminum nanopowders coated by hydroxyl-terminated polybutadiene. *Journal of Energetic Materials*. 39(3). pp. 299–312. doi: 10.1080/07370652.2020.1792584
20. Lu, Y.C. & Kuo, K.K. (1996) Thermal decomposition study of hydroxyl-terminated polybutadiene (HTPB) solid fuel. *Thermochimica acta*. 275 (2). pp. 181–191. doi: 10.1016/0040-6031(95)02726-2
21. Vorozhtsov, A.B., DeLuca, L.T., Reina, A., Lerner, M.I. & Rodkevich, N.G. (2015) Effects of HTPB-coating on nano-sized aluminum in solid rocket propellant performance. *Science and Technology of Energetic Materials*. 76. pp. 105–109.
22. Lerner, M.I., Glazkova, E.A., Lozhkomoev, A.S., Svarovskaya, N.V., Bakina, O.V., Pervikov, A.V. & Psakhie, S.G. (2016) Synthesis of Al nanoparticles and Al/AlN composite nanoparticles by electrical explosion of aluminum wires in argon and nitrogen. *Powder Technology*. 295. pp. 307–314. doi: 10.1016/j.powtec.2016.04.005
23. Chen, L., Song, W., Lv, J., Chen, X. & Xie, C. (2010) Research on the methods to determine metallic aluminum content in aluminum nanoparticles. *Materials Chemistry and Physics*. 120. pp. 670–675. doi: 10.1016/j.matchemphys.2009.12.030
24. Kuśnieruk, S., Wojnarowicz, J., Chodara, A., Chudoba, T., Gierlotka, S. & Lojkowski, W. (2016) Influence of hydrothermal synthesis parameters on the properties of hydroxyapatite nanoparticles. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 7. pp. 1586–1601. doi: 10.3762/bjnano.7.153
25. Pang, W., DeLuca, L.T., Wang, K., Fu, X., Li, J., Xu, H. & Li, H. (2019) Performance of Composite Solid Propellant Containing Nanosized Metal Particles. *Nanomaterials in Rocket Propulsion Systems*. pp. 263–298. doi: 10.1016/B978-0-12-813908-0.00007-1
26. Lozhkomoev, A.S., Rodkevich, N.G., Vorozhtsov, A.B. & Lerner, M.I. (2020) Oxidation and oxidation products of encapsulated aluminum nanopowders. *Journal of Nanoparticle Research*. 22. pp. 1–13. doi: 10.1007/s11051-019-4748-2

Информация об авторах:

Соколов Сергей Дмитриевич – младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер лаборатории № 2 Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (Бийск, Россия). E-mail: sokolovsd95@yandex.ru

Ворожцов Александр Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией высокоэнергетических и специальных материалов Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: abv@mail.tomsknet.ru

Родкевич Николай Григорьевич – главный специалист лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: ngradk@ispms.tsc.ru

Лернер Марат Израильевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией физикохимии высокодисперсных материалов Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия); главный научный сотрудник Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия) E-mail: lerner@ispms.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Sokolov Sergei D., Junior Researcher, Laboratory of nanotechnologies of metallurgy, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Engineer, Laboratory № 2, Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Biysk, Russian Federation). E-mail: sokolovsd95@yandex.ru

Vorozhtsov Alexander B., Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Research Laboratory of High Energy and Special Materials, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: abv@mail.tomsknet.ru

Rodkevich Nikolay G., Chief Specialist, Laboratory of physical chemistry of highly dispersed materials, Institute of Strength Physics and Material Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ngradk@ispms.tsc.ru

Lerner Marat I., Dr. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory of physical chemistry of highly dispersed materials, Institute of Strength Physics and Material Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: lerner@ispms.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.08.2024; одобрена после рецензирования 07.10.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 28.08.2024; approved after reviewing 07.10.2024; accepted for publication 30.10.2024

Технологии материаловедения

Научная статья

УДК 666.3.032.4, 666.3-135

doi: 10.17223/29491665/5/4

Изучение влияния содержания углеродного компонента в составе реакционно-спеченной карбидокремниевой керамики на ее физико-механические характеристики

Михаил Александрович Марков¹, Дарья Андреевна Дюскина²,
Антон Николаевич Беляков³, Андрей Геннадьевич Чекуряев⁴,
Алина Дмитриевна Быкова⁵, Александр Николаевич Николаев⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,

Санкт-Петербург, Россия

¹ barca0688@mail.ru

² randkald@mail.ru

³ anton_belyakov_n@mail.ru

⁴ achekuryaev@bk.ru

⁵ bykova.ad@gmail.com

⁶ stirborn@yandex.ru

Аннотация. Методом реакционного спекания получены образцы карбидокремниевой керамики, сформованные двумя способами: холодным одноосным прессованием и горячим шликерным литьем. Экспериментально обосновано содержание углеродного компонента в сформованной керамической заготовке для получения керамических образцов с высокими физико-механическими свойствами в зависимости от метода формования.

Ключевые слова: керамика, карбид кремния, горячее шликерное литье, реакционное спекание, предел прочности при изгибе

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 21-73-30019.

Для цитирования: Марков М.А., Дюскина Д.А., Беляков А.Н., Чекуряев А.Г., Быкова А.Д., Николаев А.Н. Изучение влияния содержания углеродного компонента в составе реакционно-спеченной карбидокремниевой керамики на ее физико-механические характеристики // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 32–39. doi: 10.17223/29491665/6/4

Original article

doi: 10.17223/29491665/6/4

Study of the influence of the carbon component content in the composition of reaction-sintered silicon carbide ceramics on its physical and mechanical characteristics

Mikhail A. Markov¹, Darya A. Dyuskina², Anton N. Belyakov³,
Andrey G. Chekuryaev⁴, Alina D. Bykova⁵, Alexander N. Nikolaev⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} National Research Centre “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus”,

St. Petersburg, Russia

¹ barca0688@mail.ru

² randkald@mail.ru

³ anton_belyakov_n@mail.ru

⁴ achekuryaev@bk.ru

⁵ bykova.ad@gmail.com

⁶ stirborn@yandex.ru

Abstract. The reaction sintering method makes it possible to produce non-shrinkable silicon carbide materials. Combining the methods of hot slip casting and reaction sintering opens the way to obtaining products of complex shapes based on silicon carbide. To obtain reaction-sintered silicon carbide materials, formed by cold uniaxial pressing and hot slip casting, with the best structural

and physical-mechanical characteristics, it is necessary to select the amount of the carbon component in the initial mixture of powders. During the work, samples with 5, 10, 15, 20 % wt. of carbon component were synthesized. For all sintered samples, the open porosity values were less than 0.4%, which is typical for reaction-sintered materials. With an increase of the carbon component, the density of the sintered pressed samples increases to reach 15% wt. of carbon in the original workpiece, after which it decreases. The increase in the density of sintered samples occurs due to the binding of all carbon present in the workpiece with silicon. Among cast ceramics, samples with 15 %wt. and 20% wt. of carbon have the highest density after sintering. Lower density of samples with 5% wt. and 10% wt. carbon is due to the fact that during siliconization, the residual porosity is filled with a low-density component - silicon (density 2.33 g/cm³). The structure of the sintered materials is a frame, which consists of grains of the original silicon carbide (SiC^I), bonded through the reaction-diffusion mechanism with a "binder filler" - secondary grains of silicon carbide (SiC^{II}). Pressed samples are characterized by greater density and, as a result, greater bending strength compared to cast ceramics. Among the pressed samples, the sample with 15 wt.% of carbon has the best properties (density 3.11 g/cm³, bending strength 398 MPa). Among the cast samples, the highest bending strength (300 MPa) is characterized by a sample with 10 wt. % of carbon. Thus, the amount of introduced soot required to obtain ceramics with high density and strength is 15% wt. of carbon for samples molded by compression, and 10% wt. for samples produced by hot slip casting.

Key words: ceramics, silicon carbide, hot slip casting, reaction sintering, bending strength

Acknowledgments: The study is funded by the Russian Science Foundation, project No. 21-73-30019.

For citation: Markov, M.A., Dyuskina, D.A., Belyakov, A.N., Chekuryaev, A.G., Bykova, A.D. & Nikolaev, A.N. (2024) Study of the influence of the carbon component content in the composition of reaction-sintered silicon carbide ceramics on its physical and mechanical characteristics. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedejatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 32–39. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/4

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция к замене металлических деталей газотурбинных двигателей на керамические, в частности карбидокремниевые. Это связано с тем, что керамика на основе карбида кремния характеризуется меньшей плотностью по сравнению с металлами, коррозионной стойкостью, высокой прочностью и фазовой стабильностью в широком интервале температур [1, 2]. Благодаря такому комплексу свойств материалы на основе карбида кремния можно применять при более высоких температурах в агрессивных средах в условиях нагружения [3].

Метод реакционного спекания позволяет получать безусадочные карбидокремниевые материалы. Совмещение методов горячего шликерного литья и реакционного спекания открывает путь к получению изделий сложной формы на основе карбида кремния [4].

Для получения реакционно-спеченных карбидокремниевых материалов, сформованных методами холодного одноосного прессования и горячего шликерного литья, с наиболее высокими физико-механическими характеристиками необходимо подобрать количество углеродного компонента в исходной смеси порошков.

Материалы и методы исследований

Для получения карбидокремниевой керамики подготавливали смесь порошков крупной (35–45 мкм) и мелкой (3–10 мкм) фракции карбида кремния в соотношении 70/30 масс.% соответственно. Данный состав шихты характеризуется наиболее плотной упаковкой, что было показано в [5]. Полученную смесь

порошков плакировали сажой, доля которой составляла 5, 10, 15, 20 масс.% сверх массы шихты.

Заготовки формовали двумя методами: холодным одноосным прессованием и горячим шликерным литьем.

Методом холодного одноосного прессования получали заготовки на гидравлическом прессе при нагрузке 100 МПа. В качестве пластификатора в пресс-порошки добавляли водный раствор полиэтиленгликоля: 3–7 масс.% от массы заготовки. После прессования для удаления излишков связки заготовки сушили при температуре 100 °С в течение 1 ч. В качестве образцов были изготовлены балки размером 70×10×4 мм.

Для получения литых заготовок подготавливали шликер на основе парафина с добавлением воска и олеиновой кислоты. В процессе приготовления шликера для сохранения его тиксотропных свойств необходимо вводить большее количество ВТС при увеличении содержания сажи в исходном порошке (табл. 1). Это связано с тем, что углерод плохо смачивается парафином.

Процесс литья проводили при температуре шликера 80 °С и рабочем давлении 3–5 бар, после чего для удаления избытка временной технической связки (ВТС) полученные заготовки сушили [6, 7]. Литые образцы засыпали в силикагель и ставили в предварительно нагретый сушильный шкаф. Начальная температура в сушильном шкафу составляла 55 °С, скорость нагрева – 10 °С/ч до температуры 95 °С, при которой проходила выдержка в течение 3–7 ч в зависимости от изначального количества ВТС.

Заготовки обсыпались чистым кусковым кремнием, доля которого составляла 80% от массы образца, после чего спекались при температуре 1 600 °С в течение 10–20 мин в вакууме. В ходе процесса спекания при температуре 300 °С происходит пиролиз

парафина, и в литых образцах образуется дополнительный остаточный углерод [8]. При достижении температуры 1400°C кремний переходит в жидкую фазу и пропитывает пористые заготовки. В теле заготовки расплав кремния взаимодействует с углеродом, образуя вторичный карбид кремния в межзеренном пространстве частиц первичного карбида кремния:

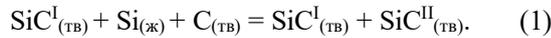


Таблица 1
Составы приготовленных шликеров

Состав шликера №	Доля углеродного компонента, масс.%	Доля порошка, масс.% (от общей массы шликера)	Количество ВТС, масс.% (от общей массы шликера)
1	5	83	17
2	10	82	18
3	15	80	20
4	20	77	23

Образовавшийся в ходе процесса реакционного спекания вторичный карбид кремния заполняет свободное поровое пространство, связывая частицы первичного карбида кремния, в результате чего формируется непрерывный поликристаллический каркас из SiC [9–11].

После спекания с поверхности полученных керамических образцов остатки кремния удаляются путем пескоструйной обработки.

Плотность и пористость полученной керамики определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 24409-80. Модуль упругости спеченных образцов определяли резонансным методом, прочность при трехточечном изгибе измеряли на универсальной испытательной машине ShimadzuAG-300kNX в соответствии с ГОСТ 24409-80. Фазовый состав карбидокремниевой керамики определяли с помощью многофункционального рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV. Для расшифровки дифрактограмм использовали базы данных COD и PDF-2. Микроструктуру спеченных образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3.

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей».

Результаты исследований

Обозначим полученные образцы согласно табл. 2.

Таблица 2
Условные обозначения образцов

Обозначение образца	Доля технического углерода (сажи) в исходном порошке, масс.%	Метод формования
П5	5	Прессование
П10	10	
П15	15	
П20	20	
Л5	5	Горячее шликерное литье
Л10	10	
Л15	15	
Л20	20	

Сравнение плотностей образцов прессовок до спекания и после представлено в виде графика на рис. 1.

Как видно из графика, с увеличением содержания углеродного компонента плотность прессовок снижается, а у спеченных образцов возрастает до достижения 15 масс.% углерода в исходной заготовке, после чего снижается. Увеличение плотности спеченных образцов происходит за счет связывания всего находящегося в заготовке углерода с кремнием. Снижение плотности спеченного образца П20 по сравнению с образцом П15 вероятно происходит из-за наличия остаточного углерода, который не прореагировал с кремнием.

Аналогичным образом была измерена плотность литых образцов. Сравнительная характеристика отображена на рис. 2.

Из графика видно, что наибольшей плотностью после спекания обладают образцы Л15 и Л20. Меньшая плотность образцов Л5 и Л10 связана с тем, что при силицировании остаточная пористость заполняется низкоплотным компонентом – кремнием (плотность 2,33 г/см³).

Для всех спеченных образцов значения открытой пористости составили менее 0,4%, что характерно для реакционно-спеченных материалов.

Проведен рентгенофазовый анализ полученных образцов. Рентгенограмма образца Л15 отображена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, в образце Л15 присутствует остаточный кремний и отсутствует углерод, что говорит о том, что 15 масс.% сажи недостаточно для полного заполнения пористости вторичным карбидом кремния при реакционном спекании. В свою очередь наличие в образце остаточного кремния может приводить к снижению прочностных характеристик получаемой керамики.

Была исследована микроструктура полученных спеченных керамик, в качестве примера на рис. 4 приведена микроструктура образца Л10 в поперечном сечении.

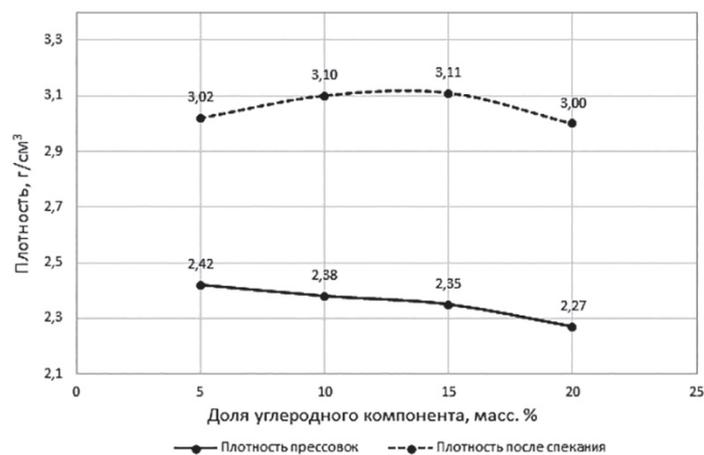


Рис. 1. Зависимость плотности прессованных образцов на разных этапах синтеза от содержания углерода
 Fig. 1. Dependence of the density of pressed samples at different stages of synthesis on carbon content

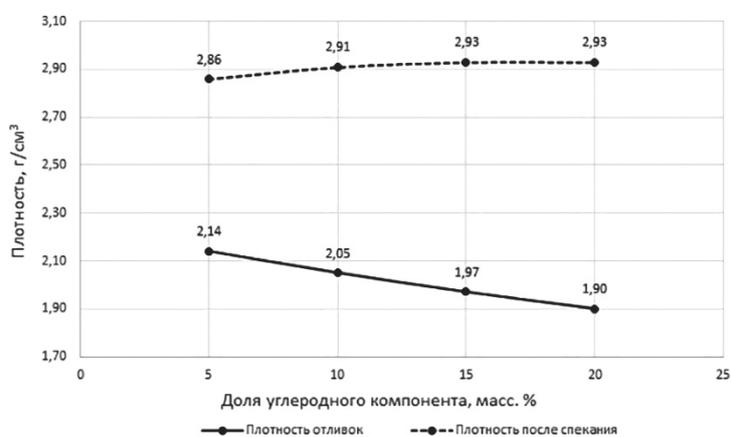


Рис. 2. Зависимость плотности литых образцов на разных этапах синтеза от содержания углерода
 Fig. 2. Dependence of the density of cast samples at different stages of synthesis on carbon content

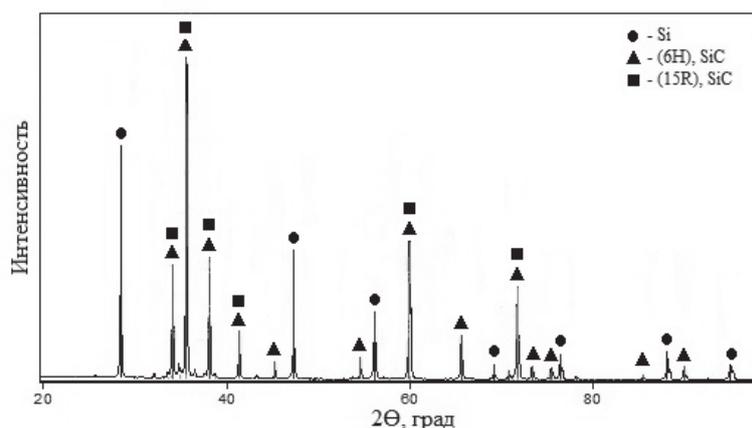


Рис. 3. Основные фазы в образце карбида кремния с углеродной добавкой 15 масс.%
 Fig. 3. The main phases in a sample of silicon carbide with a carbon additive of 15% wt.

Структура реакционно-спекенного карбида кремния представлена первичным карбидом кремния, связанным между собой вторичным карбидом кремния.

Структуру спекенных материалов можно рассматривать как каркас (рис. 5), который состоит из зерен

исходного карбида кремния (SiC^{I}), скрепленных за счет реакционно-диффузионного механизма «связующим наполнителем» – вторичными зернами карбида кремния (SiC^{II}). На рис. 5 выделены фазы полученной спекенной керамики.

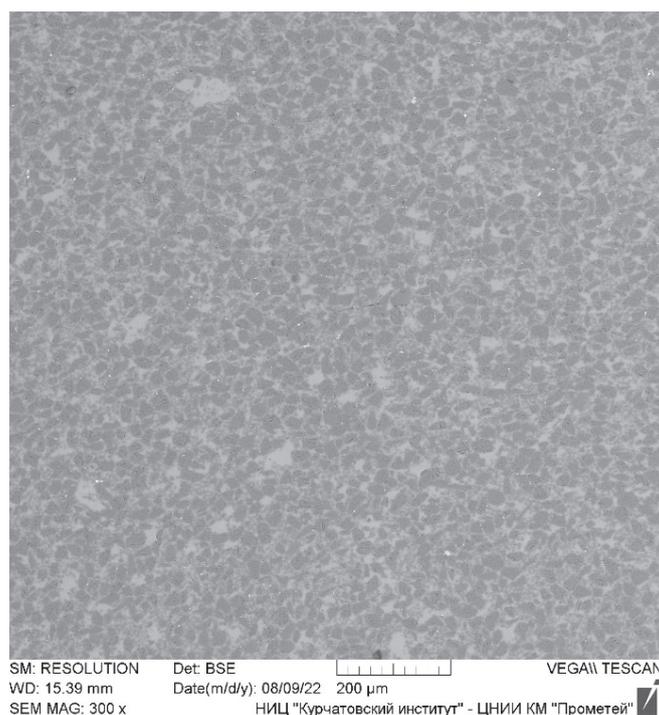


Рис. 4. Общий вид микроструктуры спеченного литого образца с 10 масс.% углерода
Fig. 4. General view of the microstructure of the sintered cast sample with 10% wt. of carbon

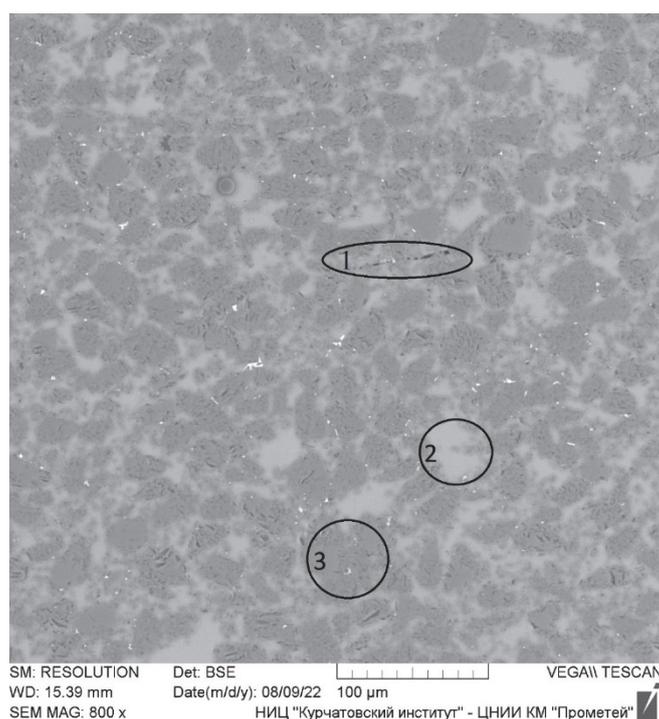


Рис. 5. Микроструктура спеченного литого образца с 10 масс.% углерода: 1 – поры; 2 (светлая фаза) – Si; 3 (темная фаза) – SiC
Fig. 5. Microstructure of a sintered cast sample with 10% wt. of carbon: 1 – pores, 2 (light phase) – Si, 3 (dark phase) – SiC

Результаты измерений физико-механических свойств для спеченных керамических образцов, сформированных методом прессования, приведены в табл. 3.

В случае образца П20 можно предположить, что в заготовке углерод был в избытке, при силицировании

не прореагировал полностью с кремнием и остался в конечном спеченном изделии. Поскольку углерод понижает прочность материала, из-за его наличия образцы П20 характеризуются меньшей прочностью по сравнению с остальными спеченными прессованными образцами.

Результаты измерений для спеченных образцов, полученных методом горячего шликерного литья, представлены в табл. 4.

В табл. 5 представлены данные по плотности и прочности образцов, полученных в работе разными методами.

Прессованные образцы характеризуются большей плотностью и, как следствие, большей прочностью на изгиб по сравнению с литыми керамиками. Среди

прессованных образцов наиболее высокими свойствами (плотность 3,11 г/см³, прочность на изгиб 398 МПа) обладает образец П15. Среди литых образцов наибольшую плотность (2,93 г/см³) имеют Л15 и Л20, образец Л10 имеет чуть меньшую плотность, но при этом характеризуется большей прочностью на изгиб – 300 МПа.

Зависимость прочности на изгиб от содержания углеродной добавки изображена на рис. 6.

Таблица 3

Значения физико-механических характеристик спеченных прессовок

Образец	$\rho \pm 0,02$, г/см ³	$P \pm 0,1$, %	Скорость звука $v \pm 100$, м/с	$E_{упр} \pm 20$, ГПа	$\sigma_{изг} \pm 20$, МПа
П5	3,02	<0,4	10 994	365	380
П10	3,10	<0,4	11 360	400	390
П15	3,11	<0,4	11 412	405	398
П20	3,00	<0,4	10 832	352	350

Таблица 4

Значения физико-механических характеристик спеченных отливок

Образец	$\rho \pm 0,02$, г/см ³	$P \pm 0,1$, %	Скорость звука $v \pm 100$, м/с	$E_{упр} \pm 20$, ГПа	$\sigma_{изг} \pm 20$, МПа
Л5	2,86	<0,4	8600	211	280
Л10	2,91	<0,4	8880	228	300
Л15	2,93	<0,4	8930	234	290
Л20	2,93	<0,4	8950	235	265

Таблица 5

Результаты исследований литых и прессованных образцов

Углеродная добавка, масс. %	Способ формования	Кажущаяся плотность $\rho \pm 0,02$, г/см ³	Относительная плотность, %	Прочность на изгиб $\sigma_{изг} \pm 20$, МПа
5	Прессование	3,02	94	380
	Литье	2,86	89	280
10	Прессование	3,10	97	390
	Литье	2,91	91	300
15	Прессование	3,11	97	398
	Литье	2,93	91	290
20	Прессование	3,00	93	350
	Литье	2,93	91	265

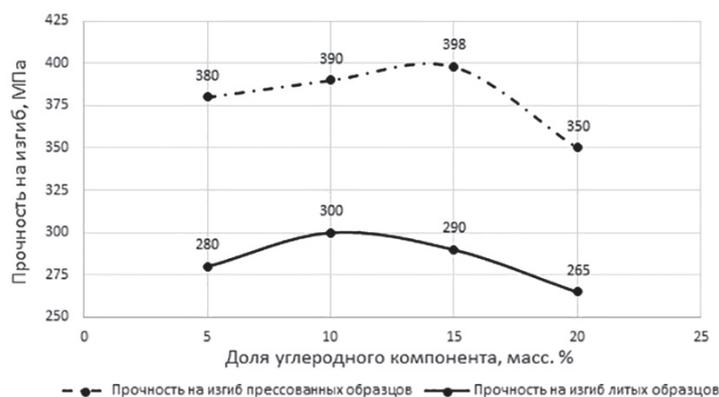


Рис. 6. Зависимость прочности на изгиб от содержания углеродной добавки для прессованных и литых образцов

Fig. 6. Dependence of bending strength on the amount of carbon additive for pressed and cast samples

Заключение

В ходе данной работы была определена зависимость механических характеристик реакционно-спекенной карбидокремниевой керамики, полученной разными способами формования (прессованием и горячим шликерным литьем), от доли углеродного компонента в спекаемой керамике.

Образцы, полученные прессованием, обладают большей прочностью на изгиб по сравнению с образцами, сформованными методом горячего шликерного литья.

Наиболее высокие свойства показала керамика, полученная прессованием порошков с 15 масс.% сажи. Она характеризуется плотностью 3,11 г/см³ (относительная плотность 97%), прочностью на изгиб порядка 398 МПа, модулем упругости 405 ГПа.

Среди литых образцов наибольшей прочностью – 300 МПа – обладает образец Л10 с плотностью 2,91 г/см³. Таким образом, доля вводимой сажи, необходимой для получения керамик с высокими плотностью и прочностью, составляет 15 масс.% для образцов, формируемых прессованием, и 10 масс.% – для образцов, получаемых горячим шликерным литьем.

Список источников

1. Abraham T. Powder Market Update: Nanoceramic Applications Emerge // *American Ceramic Society Bulletin*. 2004. Vol. 83, № 8. P. 23–25.
2. Мэттьюз Ф., Ролингс Р. Композиционные материалы. Механика и технология / пер. с англ. М. : Техносфера, 2004. 408 с.
3. Markov M.A., Vikhman S.V., Belyakov A.N., Dyuskina D.A., Kashtanov A.D., Perevislov S.N., Chekuryaev A.G., Bykova A.D. High-Temperature Bending Tests of Reaction-Sintered Silicon Carbide-Based Ceramic Materials // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2023. Vol. 96, № 1. P. 16–20. doi: 10.1134/S1070427223010032
4. Markov M.A., Belyakov A.N., Dyuskina D.A., Chekuryaev A.G., Bykova A.D., Perevislov S.N., Kashtanov A.D. Methods of forming geometrically complex manufactured products from silicon-carbide based, heat-resistant, ceramic materials // *Glass and Ceramics*. 2023. Vol. 80, № 7-8. P. 277–282. doi: 10.1007/s10717-023-00598-2
5. Belyakov A.N., Markov M.A., Kravchenko I.N., Bykova A.D., Dyuskina D.A., Chekuryaev A.G., Kashtanov A.D. Study of the Structural, Physical, and Mechanical Characteristics of Reaction-Sintered Silicon Carbide Ceramics // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2023. Vol. 52, Suppl. 1. P. S74–S81. doi: 10.1134/S1052618823090029
6. Грибовский П.О. Горячее литье керамических изделий. М. : Госэнергоиздат, 1961. 400 с.
7. Добровольский А.Г. Шликерное литье. М. : Metallurgia, 1977. 173 с.
8. Гаршин А.П. материаловедение. Техническая керамика в машиностроении : учеб. для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М. : Юрайт, 2023. 296 с.
9. Гаршин А.П., Чулкин С.Г. Реакционно-спекенные карбидокремниевые материалы конструкционного назначения. Физико-механические и триботехнические свойства. СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 84 с.
10. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М. : Metallurgia, 1977. 216 с.
11. Дьячкова Л.Н., Звонарев Е.В., Шелехина В.М., Исупов М.А. К вопросу о получении карбидокремниевых материалов методом реакционного спекания // *Инженерно-физический журнал*. 1997. Т. 70, № 2. С. 260–263.

References

1. Abraham, T. (2004) Powder Market Update: Nanoceramic Applications Emerge. *American Ceramic Society Bulletin*. 83 (8). pp. 23–25.
2. Matthews, F.L. & Rawlings, R.D. (1999) Composite materials: engineering and science. *Woodhead Publishing*; 1st edition.
3. Markov, M.A., Vikhman, S.V., Belyakov, A.N., Dyuskina, D.A., Kashtanov, A.D., Perevislov, S.N., Chekuryaev, A.G. & Bykova A.D. (2023) High-Temperature Bending Tests of Reaction-Sintered Silicon Carbide-Based Ceramic Materials. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 96 (1). pp. 16–20. doi: 10.1134/S1070427223010032
4. Markov, M.A., Belyakov, A.N., Dyuskina, D.A., Chekuryaev, A.G., Bykova, A.D., Perevislov, S.N. & Kashtanov, A.D. (2023) Methods of forming geometrically complex manufactured products from silicon-carbide based, heat-resistant, ceramic materials. *Glass and Ceramics*. 80 (7-8). pp. 277-282. doi: 10.1007/s10717-023-00598-2
5. Belyakov, A.N., Markov, M.A., Kravchenko, I.N., Bykova, A.D., Dyuskina, D.A., Chekuryaev, A.G. & Kashtanov, A.D. (2023) Study of the Structural, Physical, and Mechanical Characteristics of Reaction-Sintered Silicon Carbide Ceramics. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 52 (Suppl. 1). pp. S74–S81. doi: 10.1134/S1052618823090029
6. Gribovskiy, P.O. (1961) *Goryacheye litye keramicheskikh izdeliy* [Hot casting of ceramic products]. Moscow : Gosenergoizdat.
7. Dobrovolskiy, A.G. (1977) *Shlikernoye litye* [Hot slim casting]. Moscow : Metallurgiya.
8. Garshin, A.P. (2023) *Materialovedeniye. Tekhnicheskaya keramika v mashinostroyenii: uchebnik dlya vuzov* [Materials Science. Technical ceramics in mechanical engineering: a textbook for universities]. 2nd ed. Moscow : Izdatelstvo Yurayt.
9. Garshin, A.P., Chulkin, S.G. (2006) *Reaktionno-spechennyye karbidokremniyevyye materialy konstruktivnogo naznacheniya. Fiziko-mekhanicheskiye i tribotekhnicheskiye svoystva* [Reaction-sintered silicon carbide materials for structural purposes. Physico-mechanical and tribological properties]. Saint Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University.
10. Gnesin, G.G. (1977) *Karbidokremniyevyye materialy* [Silicon carbide materials]. Moscow : Metallurgiya. 216 p.
11. Diachkova, L.N., Zvonarev, E.V., Shelekhina, V.M. & Isupov, M.A. (1997) K voprosu o poluchenii karbidokremniyevykh materialov metodom reakcionnogo spekaniya [On the issue of obtaining silicon carbide materials by reaction sintering]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Journal of engineering physics and thermophysics*. 70 (2). pp. 260–263.

Информация об авторах:

Марков Михаил Александрович – доктор технических наук, начальник сектора «Жаростойкая керамика» лаборатории «Техническая керамика» Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: barca0688@mail.ru. ORCID: 0000-0002-3196-7535.

Дюскина Дарья Андреевна – инженер 3-й категории лаборатории «Техническая керамика» Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: randkald@mail.ru. ORCID: 0000-0002-0508-1036.

Беляков Антон Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории «Техническая керамика» Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: anton_belyakov_n@mail.ru. ORCID: 0000-0002-7849-7315.

Чекуряев Андрей Геннадьевич – инженер 3-й категории лаборатории «Техническая керамика» Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: achekuryaev@bk.ru. ORCID: 0000-0001-8541-0698.

Быкова Алина Дмитриевна – кандидат технических наук, инженер 2-й категории лаборатории «Техническая керамика» Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: bykova.ad@gmail.com. ORCID: 0000-0002-4276-5576.

Николаев Александр Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер лаборатории «Техническая керамика» Центрального научно-исследовательского института конструкционных материалов «Прометей» (Санкт-Петербург, Россия). E-mail: stirborn@yandex.ru. ORCID: 0000-0003-4818-1747.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Markov Mikhail A., Dr.Sc. (Engineering), Head of the sector “Heat-resistant ceramics”, National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus” (Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: barca0688@mail.ru

Dyuskina Daria A., Engineer of the 3rd category, National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus” (Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: randkald@mail.ru

Belyakov Anton N., Cand.Sc. (Engineering), Leading Engineer, National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus” (Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: anton_belyakov_n@mail.ru

Chekuryaev Andrey G., Engineer of the 3rd category, National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus” (Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: achekuryaev@bk.ru

Bykova Alina D., Cand.Sc. (Engineering), Engineer of the 2nd category, National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus” (Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: bykova.ad@gmail.com.

Nikolaev Alexander N., Cand.Sc. (Engineering), Leading Engineer of the Laboratory “Technical Ceramics”, National Research Center “Kurchatov Institute” – Central Research Institute of Structural Materials “Prometheus” (Saint Petersburg, Russian Federation). E-mail: stirborn@yandex.ru

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 09.04.2024; одобрена после рецензирования 26.04.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 09.04.2024; approved after reviewing 26.04.2024; accepted for publication 30.10.2024

Научная статья
УДК 533.697.4
doi: 10.17223/29491665/6/5

Поверхностно-усиленная спектроскопия комбинационного рассеяния на плазмонных наночастицах Au-Ag, полученных импульсной лазерной абляцией

Анастасия Владимировна Волокитина¹, Иван Николаевич Лапин²,
Валерий Анатольевич Светличный³

^{1, 2, 3} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *nvv0404@gmail.com*

² *201kiop@mail.ru*

³ *v_svetlichnyi@bk.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования усиления сигнала комбинационного рассеяния родамина 6Ж на плазмонных наночастицах Au, Ag и сплава Au-Ag, полученных импульсной лазерной абляцией металлов в этиловом спирте. Изучено влияние природы наночастиц и способов их нанесения на подложку на сигнал гигантского комбинационного рассеяния модельного красителя. Предложен простой метод получения ГКР-подложек для детектирования малых концентраций органических и биологических молекул.

Ключевые слова: наночастицы, сплав Au-Ag, поверхностный плазмонный резонанс, спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет 2030).

Для цитирования: Волокитина А.В., Лапин И.Н., Светличный В.А. Поверхностно-усиленная спектроскопия комбинационного рассеяния на плазмонных наночастицах Au-Ag, полученных импульсной лазерной абляцией // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 40–49. doi: 10.17223/29491665/6/5

Original article
doi: 10.17223/29491665/6/5

Surface-enhanced Raman spectroscopy of plasmonic Au-Ag nanoparticles produced by pulsed laser ablation

Anastasia V. Volokitina¹, Ivan N. Lapin², Valery A. Svetlichnyi³

^{1, 2, 3} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *nvv0404@gmail.com*

² *201kiop@mail.ru*

³ *v_svetlichnyi@bk.ru*

Abstract. The development of highly sensitive methods for the detection and identification of organic molecules for various purposes is important for solving many scientific and practical problems in biomedicine, food technology, safety, ecology, etc. Among spectroscopic methods, the Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) method, based on the use of surface plasmon resonance (SPR) of metal nanostructures, has great potential. Due to this, an increase in the Raman signal by several orders of magnitude is achieved. In this work, a simple method for producing effective SERS substrates based on plasmonic Au, Ag, and Au-Ag alloy nanoparticles for detecting low concentrations of organic and biological molecules is proposed and implemented. Nanoparticles (NPs) were obtained by pulsed laser ablation (Nd:YAG laser, 1064 nm, 7 ns, 150 mJ) in ethyl alcohol solution from mono- and bimetallic targets Au, Ag and Au-Ag respectively. Colloidal NPs were deposited using the drop-casting method onto glass substrates coated with a conductive FTO (fluorine-doped tin oxide) layer. The enhancement of the Raman signal of the obtained SERS substrates was tested using the dye rhodamine 6G. The influence of the nature of nanoparticles, the number of deposited layers, the substrate material, and methods of applying NPs to the substrate on the giant Raman scattering signal of the model dye was studied. It has been established that replacing the glass substrate with a substrate with a conductive FTO coating leads to an improvement in the uniformity of the coating and, accordingly, a decrease in the spread of the Raman signal intensity on the substrate. An increase in threshold sensitivity of up to 4 orders of magnitude has been achieved compared to the Raman signal without SPR coating. The best results in enhancing the Raman signal of rhodamine 6G are observed for bimetallic NPs with an Au-Ag ratio (1:1). The minimum concentration of the applied solution for which the Raman

signal was recorded was 10^{-9} M, corresponding to a dye concentration on the substrate of 10^{-14} g/mm²). These substrates can be used for the detection of organic and biological molecules in solutions.

Keywords: nanoparticles, Au-Ag alloy, surface plasmon resonance, surface-enhanced Raman spectroscopy

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Program (Priority-2030).

For citation: Volokitina, A.V., Lapin, I.N. & Svetlichnyi, V.A. (2024) Surface-enhanced Raman spectroscopy of plasmonic Au-Ag nanoparticles produced by pulsed laser ablation. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 40–49. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/5

Введение

Развитие высокочувствительных методов оперативного обнаружения и идентификации органических и/или биологических молекул различного назначения актуально для решения множества научных и практических задач. Среди неинвазивных спектроскопических методов большим потенциалом обладает спектроскопия комбинационного рассеяния (КР), однако относительно невысокая чувствительность ограничивает области ее применения, поскольку на комбинационные частоты приходится всего около 10^{-5} – 10^{-6} интенсивности рассеянного излучения [1]. В 1974 г. М. Флейшман и соавт. обнаружили значительное увеличение интенсивности КР-сигнала пиридина на серебряных электродах [2]. Этот эффект, получивший название Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS), или спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР), можно объяснить усилением электромагнитного поля [3]. Данный эффект заключается в локальном усилении электромагнитного поля вблизи проводящей поверхности при возбуждении поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [3]. Эффективность усиления сигнала КР у таких структурированных поверхностей или наночастиц (НЧ) зависит от их материала, размера, формы, топологии поверхности и структуры [4].

ГКР позволяет значительно (на несколько порядков) повысить чувствительность метода, что важно при анализе малых количеств вещества. В настоящее время спектроскопию ГКР успешно применяют в разных сферах жизни человека: в производстве лекарственных препаратов [5], процессе исследования крови [6], в криминалистике [7], при проверке на различные загрязнения (включая бактериологические) пищевых продуктов и объектов окружающей среды [8], а также для обнаружения токсичных и отравляющих веществ [9] и решения множества других задач, особенно в биомедицине [10].

В течение последних десятилетий возрос интерес не только к исследованию новых SERS-активных структур, но и к созданию на их основе материалов и решений с целью использования в практической деятельности. Со времени открытия ГКР и получения

первых материалов с ППР, пригодных для таких применений, создание эффективных и недорогих плазмонных систем остается актуальной задачей. Существует большое количество методов получения таких структур [11]. Так, ГКР проявляется на специально изготовленной подложке особой формы с проводящим слоем, нанесенным методом электронно-лучевой литографии [12] или методом термического напыления [13], либо на плоской поверхности с плазмонными НЧ, нанесенными из коллоидных растворов. Коллоидные растворы получают методами химического восстановления [8] или импульсной лазерной абляции (ИЛА) [5, 6]. Существуют также подходы, в которых исследуемое вещество добавляют непосредственно в коллоидные растворы плазмонных НЧ [7]. Среди металлических наноструктур три материала имеют полосы ППР в видимой области спектра – Ag, Au и Cu. Часто используются также сплавы Au-Ag, позволяющие управлять длиной волны и интенсивностью полосы ППР [14].

Большой потенциал и привлекательность для приложений ГКР имеют наночастицы, полученные ИЛА в жидкости [15]. Коллоиды, получаемые таким методом в чистых растворителях без использования прекурсоров, можно применять для создания ГКР-подложек без дополнительной подготовки. Стоит отметить, что одни из первых экспериментов по синтезу НЧ Ag, Au и Cu методом ИЛА в жидкости были выполнены именно для получения плазмонных НЧ для спектроскопии ГКР [16]. Метод ИЛА позволяет получать не только монометаллические НЧ, но и, например, биметаллические частицы [17, 18], что может быть использовано для управления характеристиками ППР и, следовательно, отклика ГКР-материалов на их основе.

В процессе исследования авторами были разработаны, изготовлены и исследованы ГКР-подложки на основе плазмонных коллоидных наночастиц благородных металлов, полученных методом импульсной лазерной абляции. Изучено влияние состава наночастиц, условий их нанесения на подложку на усиление интенсивности сигнала комбинационного рассеяния модельного органического красителя родамин 6Ж.

Методы синтеза и исследования

Синтез наночастиц и приготовление ГКР-подложек

Наночастицы Au, Ag и сплавов Au-Ag получены методом импульсной лазерной абляции в жидкости. В качестве мишеней для ИЛА использовали металлические пластины золота (содержание Au 99,99%), серебра (содержание Ag 99,99%), а также их сплавов с массовым соотношением золота к серебру, равным 1:1 и 8:1. Полученные из пластин сплавов НЧ далее обозначены как Au-Ag (1:1) и Au-Ag(8:1) соответственно. Абляция проводилась в этиловом спирте (94%, $\rho = 0,807 \text{ г/см}^3$) при воздействии на мишени сфокусированного излучения ($F = 50 \text{ мм}$) основной гармоникой импульсного Nd:YAG лазера (длина волны 1 064 нм, длительность импульса 7 нс, энергия в импульсе 150 мДж, частота повторения импульсов 20 Гц). Мишень помещали в 25 мл этилового спирта, предварительно взвесив. В процессе лазерного воздействия мишень перемещалась при помощи линейного транслятора, время ИЛА составляло 10–15 мин. После завершения синтеза мишень сушили и взвешивали. По убыли массы мишени определялась концентрация коллоидных наночастиц в полученных растворах. В данных экспериментах она составляла $50 \pm 5 \text{ мг/л}$. Методика эксперимента и экспериментальная установка представлены в [19].

В качестве основы для получения ГКР-подложек использовались два вида стекол размером $25 \times 25 \text{ мм}$ и толщиной 2 мм: предметные стекла для оптической микроскопии (ГОСТ 9284-75) и стекла с проводящим FTO-покрытием (светопропускание $\geq 84\%$, проводимость $< 10 \text{ Ом/кв.крат}$). Для нанесения наночастиц использовался капельный метод, когда капля раствора из дозатора наносилась на горизонтально расположенную поверхность подложки. Экспериментально были подобраны условия подготовки подложек и нанесения коллоидных НЧ, включая объем наносимой дисперсии (100 мкл), число наносимых слоев (от 1 до 5), время и условия сушки [20].

Методы исследования наночастиц и ГКР-подложек

Морфология наночастиц определялась методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) при помощи микроскопа CM12 (Philips, Нидерланды) с ускоряющим напряжением 120 кВ. Наночастицы наносились непосредственно из спиртовой дисперсии на специальные медные сетки с аморфным углеродным покрытием и высушивались.

Спектры поглощения коллоидных наночастиц в растворах и нанесенных на подложки регистрировались с помощью спектрофотометра Cary 100SCAN

(Varian, Австралия) в интервале длин волн 200–800 нм. Морфологию поверхности ГКР-подложек и однородность нанесения на них НЧ исследовали с помощью оптического микроскопа DM 2500M (Leica, Германия) с объективом 50 \times , сопряженного с рамановским спектрометром.

Спектры комбинационного рассеяния были получены с использованием рамановского микроскопа Renishaw InVia Basic (Великобритания). В качестве возбуждающего излучения использовался твердотельный лазер с длиной волны 532 нм и максимальной мощностью до 100 мВт. Полученные спектры обрабатывались в программе микроскопа WiRE 4.1 – производился вычет базовой линии и сглаживание спектров. В качестве тестового образца использовались спиртовые растворы красителя родамин 6Ж различной концентрации (от 10^{-9} до 10^{-5} моль/л). При помощи пипеточного дозатора на ГКР-подложку наносилось 100 мкл раствора красителя, образец высушивался на воздухе при комнатной температуре, после чего регистрировались спектры комбинационного рассеяния. Сравнение проводилось со спектрами КР, полученными от родамина 6Ж той же концентрации, нанесенного на соответствующую подложку без НЧ. Также был протестирован вариант, когда коллоидные наночастицы смешивались с раствором красителя родамин 6Ж; полученный раствор наносился на подложки.

Результаты

Свойства коллоидных наночастиц

На рис. 1 приведены изображения, полученные методом ПЭМ, и гистограммы распределения по размерам синтезированных коллоидных НЧ, которые имеют преимущественно сферическую форму. Наиболее мелкие частицы (табл. 1) формируются при ИЛА золота (средний диаметр 6,7 нм, рис. 2, *a*), самые крупные – при ИЛА серебра (16,1 нм, рис. 2, *d*), наночастицы сплавов имеют промежуточный средний диаметр (рис. 2, *b, c*). При этом в образцах присутствует незначительное количество крупных частиц размером до 50 нм.

На рис. 2 представлены спектры поглощения коллоидных растворов, полученных ИЛА в спирте. При одинаковой массовой концентрации НЧ (50 мг/л) и толщине слоя 2 мм серебро имеет наибольшую интенсивность поглощения полосы ППП, что соответствует литературным данным [21]. Максимум поглощения полосы ППП НЧ серебра в спирте – 402 нм (табл. 1). Добавление золота приводит к уменьшению интенсивности полосы ППП и сдвигу ее максимума в длинноволновую область. Данная тенденция находится в соответствии с тем, что максимум поглощения чистых НЧ Au зарегистрирован при 526 нм.

Таблица 1

Характеристики коллоидных НЧ, полученных ИЛА в спирте

Образец	Максимум длины волны ППР, нм	Размер НЧ (ПЭМ), нм	
		Средний диаметр	Стандартное отклонение
Au	526	6,7	2,4
Au-Ag (8:1)	502	9,2	4,4
Au-Ag (1:1)	440	13,7	7,4
Ag	402	16,1	7,8

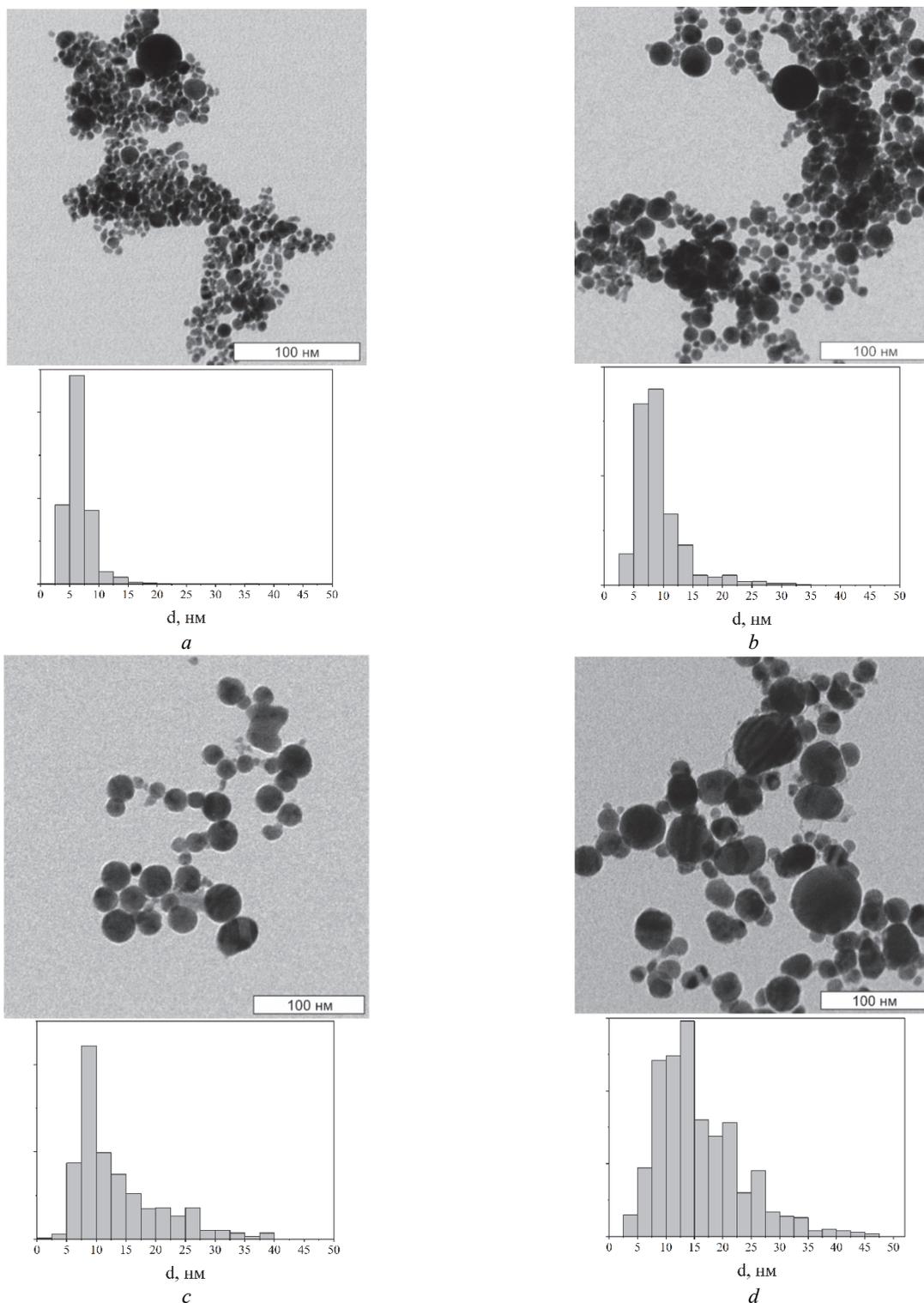


Рис. 1. Изображения, полученные с ПЭМ, и распределение НЧ по размеру: *a* – Au; *b* – Au-Ag (8:1); *c* – Au-Ag (1:1); *d* – Ag
 Fig. 1. TEM images and NP size distribution: *a* – Au; *b* – Au-Ag (8:1); *c* – Au-Ag (1:1); *d* – Ag

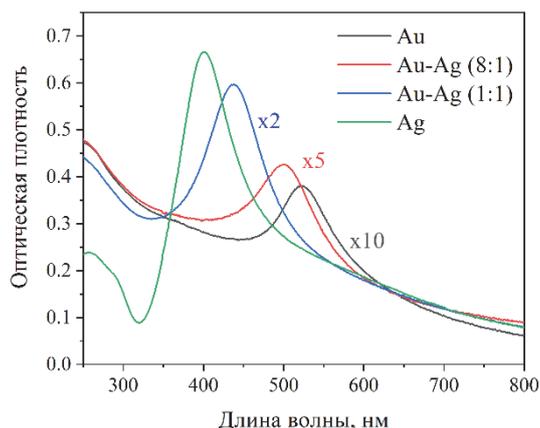


Рис. 2. Спектры поглощения коллоидных НЧ золота, серебра и сплавов Au-Ag (8:1), Au-Ag (1:1), полученных ИЛА в этиловом спирте

Fig. 2. Absorption spectra of colloidal NPs of gold, silver and alloys Au-Ag (8:1), Au-Ag (1:1) obtained by ILA in ethanol

Свойства ГКР-подложек

На рис. 3 приведены микрофотографии поверхности ГКР-подложек с нанесенными НЧ золота в 5 слоев. Видно, что в случае FTO-покрытия НЧ Au (светлые области) более равномерно распределены по поверхности, что должно обеспечивать более однородные оптические характеристики полученных материалов. Аналогичная зависимость наблюдается для НЧ серебра и сплавов Au-Ag, причем однородность распределения НЧ возрастает по мере увеличения числа наносимых слоев.

Спектры поглощения коллоидных НЧ после их нанесения на подложки и высушивания уширяются и сдвигаются в длинноволновую область (рис. 4, *a*) относительно спектров поглощения коллоидных растворов (см. рис. 2). Это связано с агрегацией

частиц и изменением диэлектрической проницаемости окружающей среды. Длинноволновый сдвиг, связанный с агрегацией НЧ, увеличивается с ростом числа нанесенных слоев (рис. 4, *b*). Оптическая плотность в области ППП наночастиц также возрастает по мере увеличения числа наносимых слоев (рис. 4, *b, c*), т.е. концентрации частиц. На рис. 4, *c* показано, что у ГКР-подложек на основе стекла с проводящим FTO покрытием наблюдается интерференция, связанная с тонким покрытием FTO, искажающая форму спектров ППП металлических НЧ.

Исследование усиления интенсивности сигнала КР родамина 6Ж на ГКР-подложках

Перед началом исследования КР-спектров родамина 6Ж были зарегистрированы сигналы с изготовленных ГКР-подложек без нанесения красителя (рис. 5).

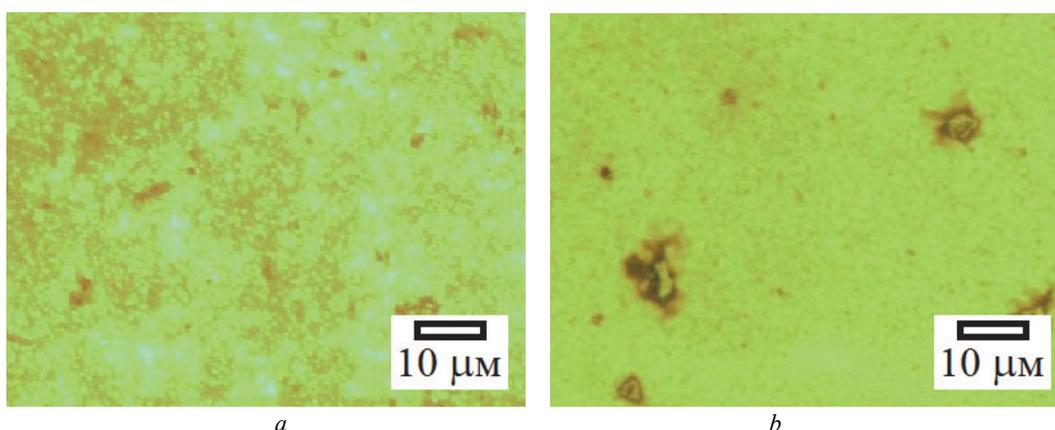


Рис. 3. Микрофотографии коллоидных НЧ золота, нанесенных на (а) стеклянную подложку и (б) подложку с FTO-покрытием

Fig. 3. Microphotographs of colloidal gold NPs deposited on (a) a glass substrate and (b) an FTO-coated substrate

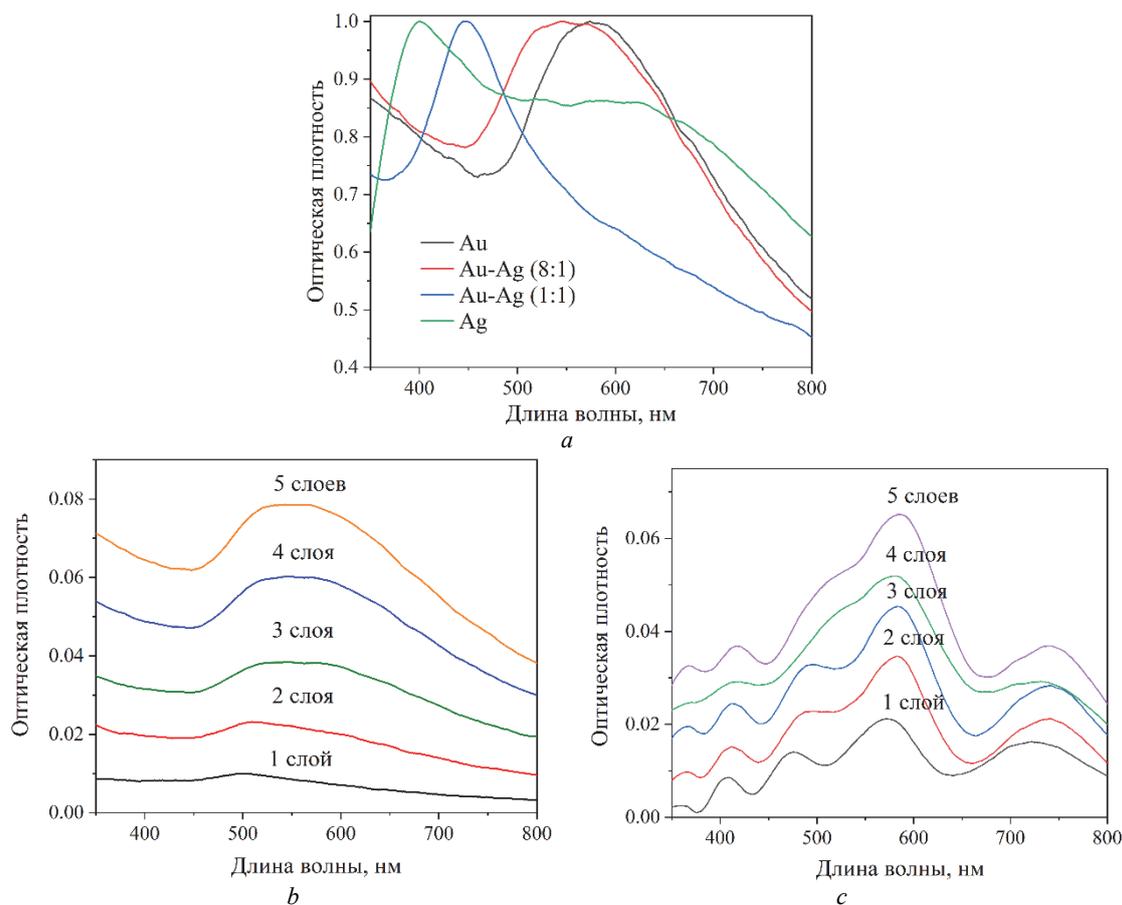


Рис. 4. Спектры поглощения ГКР-подложек с нанесенными коллоидными НЧ: *a* – нормированные спектры различных НЧ на стекле, нанесенных в 4 слоя; *b* – зависимость оптической плотности от числа нанесенных слоев НЧ Au-Ag (8:1) на стекле; *c* – зависимость оптической плотности от числа нанесенных слоев НЧ Au на стекле с FTO-покрытием

Fig. 4. Absorption spectrum of SERS substrates with deposited colloidal NPs: (*a*) normalized spectra of various nanoparticles on glass deposited in 4 layers, (*b*) dependence of optical density on the number of deposited layers of Au-Ag (8:1) NPs on glass, (*c*) dependence of optical density on the number of deposited layers of Au NPs on glass with FTO-coating

FTO-подложка с золотыми наночастицами не дает дополнительных сигналов КР, в то время как подложка из предметного стекла для микроскопии показывает слабый широкий сигнал в области 1090 см^{-1} . Подложка с нанесенными серебряными НЧ демонстрирует в спектре несколько полос с максимумом в области 1568 см^{-1} . Эти же полосы проявляются и для подложек с нанесенными НЧ Au-Ag, но их интенсивность уменьшается по мере уменьшения содержания серебра. Природа этих полос вызывает дискуссию и требует отдельного исследования. Они могут быть отнесены как к колебаниям карбонатных групп на поверхности частиц, так и к обертонам колебаний Ag_2O [22]. Согласно [23, 24] данные полосы также могут быть отнесены к люминесценции индивидуальных серебросодержащих частиц. Вместе с тем эти полосы достаточно широкие и не мешают регистрации и выделению сигнала аналита, имеющего узкие полосы сигнала КР.

На рис. 6, *a* приведены типичные сигналы КР родамина 6Ж, нанесенного из раствора с различными

концентрациями, полученные на трехслойной ГКР-подложке с НЧ Au-Ag (1:1) на стекле с FTO-покрытием после вычета базовой линии. Регистрируемый КР-спектр родамина 6Ж хорошо совпадает с литературными данными [25]. Минимальная концентрация наносимого раствора красителя, которая обнаруживается на ГКР-подложке, составляет 10^{-9} М . Отметим, что без нанесения наночастиц родамин 6Ж регистрировался только при нанесении на стеклянную или FTO-подложку из раствора с концентрациями от 10^{-5} М и выше. Таким образом, порог обнаружения уменьшился на четыре порядка. На рис. 6, *b* приведены зависимости интенсивности сигнала КР (по полосе 1649 см^{-1}) для ГКР-подложек в зависимости от вида нанесенных коллоидных частиц и числа слоев. При увеличении числа наносимых слоев НЧ интенсивность КР-сигнала монотонно возрастает, однако при большом числе слоев наступает насыщение (не показано на графике), связанное с агломерацией частиц и отсутствием оптимальных условий для усиления сигнала [3].

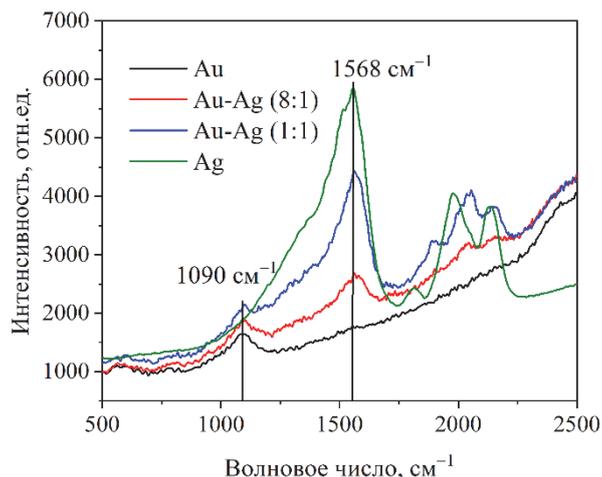


Рис. 5. КР-спектры ГКР-подложек на основе предметного стекла с нанесенными коллоидными НЧ Au, Au-Ag (8:1), Au-Ag (1:1) и Ag

Fig. 5. Raman spectra of SERS-substrates based on a glass slide with deposited colloidal Au, Au-Ag (8:1), Au-Ag (1:1) and Ag NPs

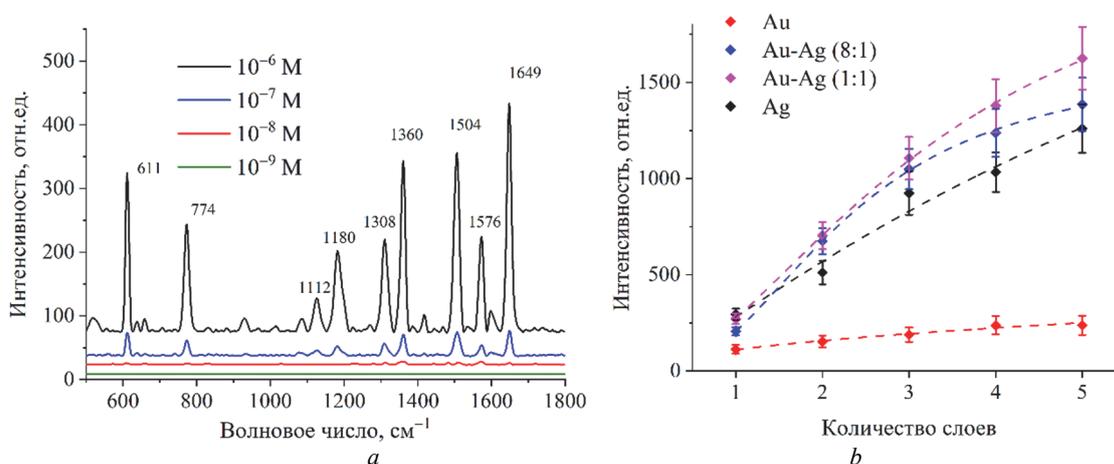


Рис. 6. КР-спектры родамина 6Ж на трехслойной ГКР-подложке с НЧ Au-Ag (1:1) (a) и зависимость интенсивности КР-сигнала (на 1649 см⁻¹) от числа нанесенных слоев для различных НЧ (b); основа – стекло с FTO-покрытием

Fig. 6. Raman spectra of rhodamine 6G on a 3-layer SERS-substrate with Au-Ag (8:1) (1:1) (a) and the dependence of the Raman signal intensity (at 1649 cm⁻¹) on the number of deposited layers for different NPs (b); base – glass with FTO-coating

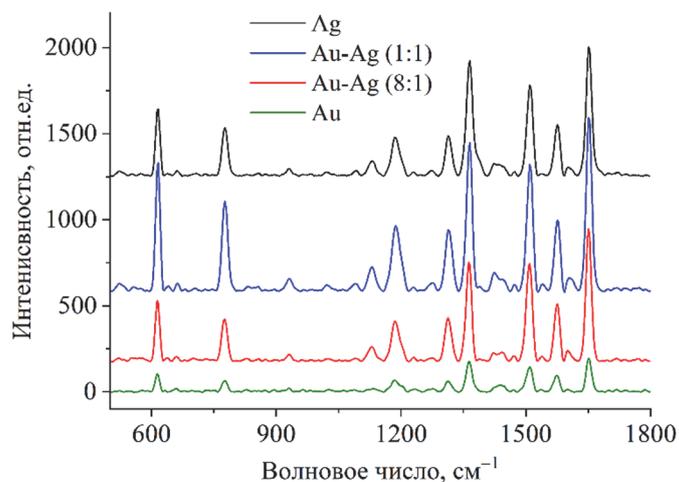


Рис. 7. КР-спектры родамина 6Ж на ГКР-подложке при нанесении смеси НЧ с красителем; основа – стекло с FTO-покрытием

Для ГКР-подложек на предметном стекле и стекле с ФТО-покрытием для одинаковых наночастиц и числа нанесенных слоев значения интенсивностей КР-сигналов родамина 6Ж близки. Но из-за большей неоднородности нанесения НЧ на стеклянную подложку (см. рис. 3) для ГКР-подложек на ФТО различие между минимальным и максимальным сигналами меньше (в среднем не более чем в 2 раза), в то время как для стеклянных подложек эти сигналы могут различаться в 5–6 раз. В конце исследования был протестирован вариант получения сигнала ГКР, когда раствор родамина 6Ж наносился не на готовую подложку со слоем НЧ, а наночастицы предварительно смешивались с красителем, а затем смесь наносилась на покрытие (рис. 7). Данные на рис. 7 соответствуют одному слою нанесенных НЧ и концентрации родамина 6Ж, равной 10^{-6} М. При этом сравнение в одном эксперименте интенсивности КР родамина 6Ж, нанесенного на предварительно приготовленные ГКР-подложки, с интенсивностью КР красителя, нанесенного совместно с частицами, показало, что в первом случае интенсивность сигнала в 6–8 раз выше.

Заключение

Предложен и реализован простой капельный метод получения ГКР-подложек на основе наночастиц, полученных импульсной лазерной абляцией в спирте. Данные материалы протестированы на красителе родамин 6Ж. Установлено, что замена стеклянной подложки на подложку с проводящим ФТО-покрытием приводит к улучшению однородности покрытия и уменьшению разброса интенсивности КР-сигнала на подложке. Достигнуто увеличение пороговой чувствительности до четырех порядков по сравнению с сигналом КР без нанесения плазмонных НЧ. Максимальное усиление интенсивности сигнала КР родамина 6Ж наблюдается для биметаллических НЧ Au-Ag (1:1). Минимальная концентрация нанесенного раствора, для которой зарегистрирован КР-сигнал, составила 10^{-9} М, что соответствует 10^{-14} г/мм². Данные подложки можно использовать для обнаружения органических и биологических молекул в растворах.

Список источников

1. Колесов Б.А. Прикладная КР-спектроскопия. Новосибирск : СО РАН, 2018. 389 с.
2. Fleischmann M., Hendra P.J., McQuillan A.J. Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode // *Chemical Physics Letters*. 1974. Vol. 26, № 2. P. 163–166. doi: 10.1016/0009-2614(74)85388-1
3. Schlücker S. Surface enhanced Raman spectroscopy: analytical, biophysical and life science applications. Weinheim, Germany : WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011. 348 p.
4. He R.X., Liang R., Peng P., Zhou Y. N. Effect of the size of silver nanoparticles on SERS signal enhancement // *Journal Nanoparticle Research*. 2017. Vol. 19. P. 266–276. doi: 10.1007/s11051-017-3953-0
5. Santoro M., Fazio E., Trusso S., Tommasini M., Lucotti A., Saija R., Casazza M., Neri F., Ossi P.M. SERS sensing of perampanel with nanostructured arrays of gold particles produced by pulsed laser ablation in water // *Medical Devices & Sensors*. 2018. Vol. 1, № 1. P. e10003. doi: 10.1002/mds3.10003
6. Litti L., Ramundoa A., Biscaglia F., Toffoli G., Gobbo M., Meneghetti M. A surface enhanced Raman scattering based colloid nanosensor for developing Therapeutic Drug Monitoring // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2019. Vol. 533. P. 621–626. doi: 10.1016/j.jcis.2018.08.107
7. Gloria M.H., Amira C.P., Samuel P.H. Surface enhanced raman scattering (SERS) studies of gold and silver nanoparticles prepared by laser // *Nanomaterials*. 2013. Vol. 3, № 1. P. 158–172. doi: 10.3390/nano3010158
8. Krafft B., Tycova A., Urban R.D., Dusny C., Belder D. Microfluidic device for concentration and SERS-based detection of bacteria in drinking water // *Electrophoresis*. 2020. Vol. 42, № 1-2. P. 86–94. doi: 10.1002/elps.202000048
9. Pearman W.F., Fountain 3rd A.W. Classification of chemical and biological warfare agent simulants by surface-enhanced Raman spectroscopy and multivariate statistical techniques // *Applied Spectroscopy*. 2006. Vol. 60, № 4. P. 356–365. doi: 10.1366/000370206776593744
10. Demirel G., Usta H., Yilmaz M., Celik M., Alidagi H.A., Buyukserin F. Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS): an adventure from plasmonic metals to organic semiconductors as SERS platforms // *Journal of Materials Chemistry C*. 2018. Vol. 6. P. 5314. doi: 10.1039/c8tc01168k
11. Kannan P.K., Shankar P., Blackman C., Chung C.-H. Recent advances in 2D inorganic nanomaterials for SERS sensing // *Advanced Materials*. 2019. Vol. 31, № 34. P. 1803432. doi: 10.1002/adma.201803432
12. Gellini C., Muniz-Miranda F., Pedone A., Muniz-Miranda M. SERS active Ag-SiO₂ nanoparticles obtained by laser ablation of silver in colloidal silica // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2018. Vol. 9. P. 2396–2404. doi: 10.3762/bjnano.9.224
13. Zhou L., Poggesi S., Bariani G.C., Mittapalli R., Adam P.-M., Manzano M., Ionescu R.E. Robust SERS platforms based on annealed gold nanostructures formed on ultrafine glass substrates for various (bio)applications // *Biosensors*. 2019. Vol. 9, № 2. P. 53. doi: 10.3390/bios9020053
14. Ji J., Li Z. Tunable surface plasmon resonance wavelengths response from Au/Ag nanocomposite system // *Thin Solid Films*. 2023. Vol. 764. P. 139602. doi: 10.1016/j.tsf.2022.139602
15. Zhang D., Gökce B., Barcikowski S. Laser synthesis and processing of colloids: fundamentals and applications // *Chemical Reviews*. 2017. Vol. 117. P. 3990–4103 doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00468
16. Neddersen J., Chumanov G., Cotton T.M. Laser ablation of metals: a new method for preparing SERS active colloids // *Applied Spectroscopy*. 1993. Vol. 47. P. 1959–1964. doi: 10.1366/0003702934066460
17. Timofeev K.L., Kharlamova T.S., Ezhov D.M., Salaev M.A., Svetlichnyi V.A., Vodyankina O.V. Hydroxymethylfurfural oxidation over unsupported Pd-Au alloy catalysts prepared by pulsed laser ablation: Synergistic and compositional effects // *Applied Catalysis A*. 2023. Vol. 656. P. 119121. doi: 10.1016/j.apcata.2023.119121

18. Coviello V., Forrer D., Amendola V. Recent developments in plasmonic alloy nanoparticles: synthesis, modelling, properties and applications // *ChemPhysChem*. 2022. Vol. 23, № 21. P. e202200136. doi: 10.1002/cphc.202200136
19. Светличный В.А., Лапин И.Н. Оптимизация процесса получения наночастиц методом лазерной абляции объемных мишеней в жидкости // *Известия ВУЗов. Физика*. 2014. Т. 57, № 12. С. 150–152.
20. Патент № 2789995 Российская Федерация. Способ получения тонких пленок из коллоидных растворов наночастиц благородных металлов и их сплавов, полученных методом импульсной лазерной абляции, для спектроскопии усиленного комбинационного рассеяния / Волокитина А.В., Лапин И.Н., Светличный В.А. № 2022114269, заявл. 27.05.2022; опубл. 14.02.2023. Бюл. № 5. 11 с.
21. Matur M., Madhyastha H., Shruthi T.S., Madhyastha R., Srinivas S.P., Navya P.N., Daima H.K. Engineering bioactive surfaces on nanoparticles and their biological interactions // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. P. 19713. doi: 10.1038/s41598-020-75465-z
22. Сидоров А.В. Химически модифицированные нанокompозиты на основе серебра для спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния маркеров нефтепродуктов // Дис. канд. хим. наук. 2016. 119 с.
23. Chuang C.-M., Wu M.-C., Su W.-F. High intensity fluorescence of photoactivated silver oxide from composite thin film with periodic array structure // *Applied Physics Letters*. 2006. Vol. 89. P. 061912. doi: 10.1063/1.2222252
24. Peyser L.A., Vinson A.E., Bartko A.P., Dickson R.M. Photoactivated Fluorescence from Individual Silver Nanoclusters // *Science*. 2001. Vol. 291. № 5501. P. 103–106. doi: 10.1126/science.291.5501.103
25. Yarov K.E., Grigorieva A.V., Sidorov A.V., Polyakov A.Yu., Sukhorukova I.V., Shtansky D.V., Grunert W., Goodilin E.A. Inkjet printing of silver rainbow colloids for SERS chips with polychromatic sensitivity // *RSC Adv*. 2016. Vol. 6. P. 15535–15540. doi: 10.1039/c5ra25907j

References

1. Kolesov, B.A. (2018) *Prikladnaya KR-spektroskopiya* [Applied Raman spectroscopy]. Novosibirsk: SB RAS.
2. Fleischmann, M., Hendra, P.J. & McQuillan, A.J. (1974) Raman spectra of pyridine adsorbed at a silver electrode. *Chemical Physics Letters*. 26 (2). pp. 163–166. doi: 10.1016/0009-2614(74)85388-1
3. Schlücker, S. (2011) *Surface enhanced Raman spectroscopy: analytical, biophysical and life science applications*. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA
4. He, R.X., Liang, R., Peng, P. & Zhou, Y.N. (2017) Effect of the size of silver nanoparticles on SERS signal enhancement. *Journal Nanoparticle Research*. 19. pp. 266–276. doi: 10.1007/s11051-017-3953-0
5. Santoro, M., Fazio, E., Trusso, S., Tommasini, M., Lucotti, A., Saija, R., Casazza, M., Neri, F. & Ossi, P.M. (2018) SERS sensing of perampanel with nanostructured arrays of gold particles produced by pulsed laser ablation in water. *Medical Devices & Sensors*. 1 (1). pp. e10003. doi: 10.1002/mds3.10003
6. Litti, L., Ramundoa, A., Biscaglia, F., Toffoli, G., Gobbo, M. & Meneghetti, M. (2019) A surface enhanced Raman scattering based colloid nanosensor for developing Therapeutic Drug Monitoring. *Journal of Colloid and Interface Science*. 533. pp. 621–626. doi: 10.1016/j.jcis.2018.08.107
7. Gloria, M.H., Amira, C.P. & Samuel, P.H. (2013) Surface enhanced raman scattering (SERS) studies of gold and silver nanoparticles prepared by laser. *Nanomaterials*. 3 (1). pp. 158–172. doi: 10.3390/nano3010158
8. Krafft, B., Tycova A., Urban, R.D., Dusny, C. & Belder, D. (2020) Microfluidic device for concentration and SERS-based detection of bacteria in drinking water. *Electrophoresis*. 42 (1-2). pp. 86–94. doi: 10.1002/elps.202000048
9. Pearman, W.F. & Fountain, A.W. (2006) Classification of chemical and biological warfare agent simulants by surface-enhanced Raman spectroscopy and multivariate statistical techniques. *Applied Spectroscopy*. 60 (4). pp. 356–365. doi: 10.1366/000370206776593744
10. Demirel, G., Usta, H., Yilmaz, M., Celik, M., Alidagi, H.A. & Buyukserin, F. (2018) Surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS): an adventure from plasmonic metals to organic semiconductors as SERS platforms. *Journal of Materials Chemistry C*. 6. pp. 5314. doi: 10.1039/c8tc01168k
11. Kannan, P.K., Shankar, P., Blackman, C. & Chung, C.-H. (2019) Recent advances in 2D inorganic nanomaterials for SERS sensing. *Advanced Materials*. 31 (34). pp. 1803432. doi: 10.1002/adma.201803432
12. Gellini, C., Muniz-Miranda, F., Pedone, A. & Muniz-Miranda, M. (2018) SERS active Ag–SiO₂ nanoparticles obtained by laser ablation of silver in colloidal silica. *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 9. pp. 2396–2404. doi: 10.3762/bjnano.9.224
13. Zhou, L., Poggesi, S., Bariani, G.C., Mittapalli, R., Adam, P.-M., Manzano, M. & Ionescu, R.E. (2019) Robust SERS platforms based on annealed gold nanostructures formed on ultrafine glass substrates for various (bio)applications. *Biosensors*. 9 (2). pp. 53. doi: 10.3390/bios9020053
14. Ji, J. & Li, Z. Tunable surface plasmon resonance wavelengths response from Au/Ag nanocomposite system. *Thin Solid Films*. 2023. 764. pp. 139602. doi: 10.1016/j.tsf.2022.139602.
15. Zhang, D., Gökce, B. & Barcikowski, S. (2017) Laser synthesis and processing of colloids: fundamentals and applications. *Chemical Reviews*. 117. pp. 3990–4103 doi: 10.1021/acs.chemrev.6b00468
16. Neddersen, J., Chumanov, G. & Cotton, T.M. (1993) Laser ablation of metals: a new method for preparing SERS active colloids. *Applied Spectroscopy*. 47. pp. 1959–1964. doi: 10.1366/0003702934066460
17. Timofeev, K.L., Kharlamova, T.S., Ezhov, D.M., Salaev, M.A., Svetlichnyi, V.A. & Vodyankina, O.V. (2023) Hydroxymethylfurfural oxidation over unsupported Pd-Au alloy catalysts prepared by pulsed laser ablation: Synergistic and compositional effects. *Applied Catalysis A*. 656. pp. 119121. doi: 10.1016/j.apcata.2023.119121
18. Coviello, V., Forrer, D. & Amendola, V. (2022) Recent developments in plasmonic alloy nanoparticles: synthesis, modelling, properties and applications. *ChemPhysChem*. 23 (21). pp. e202200136. doi: 10.1002/cphc.202200136

19. Svetlichny, V.A. & Lapin, I.N. Optimizatsiya protsessa polucheniya nanochastits metodom lazernoy ablyatsii ob"yemnykh misheney v zhidkosti [Optimization of the process of nanoparticle fabrication by laser ablation of bulk targets in a liquid] *Izvestiya VUZov. Fizika*. 2014. 57 (12). pp. 150–152. doi: 10.1007/s11182-015-0452-6
20. Volokitina, A.V., Lapin, I.N. & Svetlichny, V.A. (2023) Sposob polucheniya tonkih plenok iz kolloidnykh rastvorov nanochastich blagorodnykh metallov i ih splavov, poluchennykh metodom impul'snoy lazernoy ablyatsii, dlya spektroskopii usilennogo kombinatsionnogo rasseyaniya [The ability to obtain thin films from colloidal solutions of nanoparticles of noble metals and their alloys using pulsed laser ablation for enhanced Raman spectroscopy] Patent No. 2789995 Russian Federation. № 2022114269, appl. 27.05.2022; publication date 14.02.2023, Bul. No. 5.
21. Matur, M., Madhyastha, H., Shruthi, T.S., Madhyastha, R., Srinivas, S.P., Navya, P.N. & Daima, H.K. (2020) Engineering bioactive surfaces on nanoparticles and their biological interactions. *Scientific Reports*. 10. pp. 19713. doi: 10.1038/s41598-020-75465-z
22. Sidorov, A.V. (2016) *Himicheski modifitsirovannye nanokompozity na osnove serebra dlya spektroskopii gigantskogo kombinatsionnogo rasseyaniya markerov nefteproduktov* [Chemically modified silver-based nanocomposites for giant Raman spectroscopy of petroleum markers]. Cand.Sc. Diss.
23. Chuang, C.-M., Wu, M.-C. & Su, W.-F. (2006) High intensity fluorescence of photoactivated silver oxide from composite thin film with periodic array structure. *Applied Physics Letters*. 89. pp 061912. doi: 10.1063/1.2222252
24. Peyser, L.A., Vinson, A.E., Bartko, A.P. & Dickson, R.M. (2001) Photoactivated Fluorescence from Individual Silver Nanoclusters. *Science*. 291 (5501). pp 103–106. doi: 10.1126/science.291.5501.103
25. Yarov, K.E., Grigorieva, A.V., Sidorov, A.V., Polyakov, A.Yu., Sukhorukova, I.V., Shtansky, D.V., Grunert, W. & Goodilin, E.A. (2016) Inkjet printing of silver rainbow colloids for SERS chips with polychromatic sensitivity. *RSC Adv*. 6. pp. 15535–15540. doi: 10.1039/c5ra25907j

Информация об авторах:

Волокитина Анастасия Владимировна – аспирант кафедры оптики и спектроскопии физического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nvv0404@gmail.com

Лапин Иван Николаевич – старший научный сотрудник лаборатории новых материалов и перспективных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: 201kiop@mail.ru

Светличный Валерий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией новых материалов и перспективных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: v_svetlichnyi@bk.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Volokitina Anastasia V., Postgraduate Student, Department of Optics and Spectroscopy, Faculty of Physics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nvv0404@gmail.com

Lapin Ivan N., Senior Researcher, Laboratory of Advanced Materials and Technology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: 201kiop@mail.ru

Svetlichnyi Valery A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Laboratory of Advanced Materials and Technology, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation) E-mail: v_svetlichnyi@bk.ru

The authors declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 19.01.2024; одобрена после рецензирования 29.05.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 19.01.2024; approved after reviewing 29.05.2024; accepted for publication 30.10.2024

Биотехнологии

Научная статья

УДК 621.7

doi: 10.17223/29491665/6/6

Технологические особенности обеспечения отделочной обработки сплавов и материалов медицинского назначения

Артём Сергеевич Бабаев¹, Екатерина Сергеевна Марченко²,
Артём Романович Семёнов³, Александр Сергеевич Гарин⁴

^{1, 2, 3, 4} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *a.s.babaev@mail.tsu.ru*

² *89138641814@mail.ru*

³ *a.r.semenov@mail.tsu.ru*

⁴ *stik-020@mail.ru*

Аннотация. Сплавы и материалы медицинского назначения относятся к материалам с пониженной обрабатываемостью. Актуальными остаются вопросы получения точных линейно-угловых размеров при формировании низкой шероховатости поверхности и сохранения стабильности механических характеристик поверхностного слоя. В статье рассмотрены особенности технологий отделочно-абразивной и безабразивной обработки, применяемых на заключительных операциях изготовления изделий из современных медицинских материалов.

Ключевые слова: кобальт-хром, нитинол, диоксид циркония, галтовка, полирование, шероховатость

Для цитирования: Бабаев А.С., Марченко Е.С., Семёнов А.Р., Гарин А.С. Технологические особенности обеспечения отделочной обработки сплавов и материалов медицинского назначения // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 50–58. doi: 10.17223/29491665/6/6

Original article

doi: 10.17223/29491665/6/6

Technological features of providing finishing processing of alloys and materials for medical industry

Artem S. Babaev¹, Ekaterina S. Marchenko², Artem R. Semenov³, Aleksandr S. Garin⁴

^{1, 2, 3, 4} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *a.s.babaev@mail.tsu.ru*

² *89138641814@mail.ru*

³ *a.r.semenov@mail.tsu.ru*

⁴ *stik-020@mail.ru*

Abstract. Alloys and materials for medical purposes belong to materials with reduced machinability. The questions of obtaining accurate linear-angular dimensions while forming low surface roughness and maintaining the stability of mechanical characteristics of the surface layer remain relevant. In the article features of technologies of finishing-abrasive and abrasive-free processing of such materials as cobalt-chromium alloy, nitinol and ceramics based on zirconium dioxide are considered. The paper shows the results of finishing processing on the example of knee joint endoprosthesis at drag finishing tumbling; coronary stent from nitinol and its processing in an innovative unit for dry polishing; small limb joint endoprosthesis blanks of zirconium dioxide in a closed-cycle rotary tumbling machine. In the course of research attention was paid to surface roughness, as well as to the preservation of the geometric shape of the initial surface. The data analysis showed that when processing cobalt-chromium alloy it is possible to provide roughness Ra less than 0.02 µm; when processing by dry electrolytic polishing of nitinol stents the roughness change depends on the processing time; when deburring of hard ceramic material it becomes possible to achieve roughness stably about Ra 0.02 µm.

Keywords: cobalt-chrome, nitinol, zirconium dioxide, tumbling, polishing, roughness

For citation: Babaev, A.S., Marchenko, E.S., Semenov, A.R. & Garin, A.S. (2024) Technological features of providing finishing processing of alloys and materials for medical industry. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 50–58. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/6

Введение

К медицинским изделиям, изготавливаемым из металлических и керамических материалов, предъявляются особые требования по точности геометрической формы, шероховатости поверхности, а также по обеспечению стабильности механических свойств. В совокупности это оказывает существенное влияние на эксплуатационные характеристики изделий, а также напрямую сказывается на трудоёмкости и себестоимости их изготовления. Последнее обстоятельство имеет место при производстве заготовок индивидуальных протезов, получаемых, например, методами аддитивных технологий или литья. Последующая субтрактивная обработка формирует геометрию изделия с коэффициентом использования материала, приближенным к максимуму. Получение окончательной размерной точности и шероховатости происходит на заключительных операциях, которые могут занимать до 70% общего машинного времени изготовления.

Повышение степени автоматизации и роботизации труда привело к появлению технологий, позволяющих существенно сократить вспомогательное время при использовании как абразивной, так и безабразивной обработки. Однако широкая номенклатура изделий и требований к ним не позволяют выполнить унификацию технологических процессов с высокой эффективностью. В этой связи при изготовлении трудоёмких изделий медицинского назначения их специальных металлических сплавов и керамик нашли применение и показали свою эффективность некоторые инновационные технологии.

Цель данного исследования заключается в выработке рекомендаций по применению новых технологий отделочной обработки материалов медицинского назначения.

Материалы и методы исследования

Рассмотрим несколько типовых примеров обеспечения отделочной обработки изделий медицинского назначения.

Последовательность технологических операций производства бедренного компонента эндопротеза коленного сустава из CoCr выглядит следующим образом [1]: создание 3D-модели по результатам компьютерной томографии; многоосевая (3+2) фрезерная обработка заготовки; ручное шлифование на лентах; ручное полирование. Существенным недостатком является наличие ручных операций.

Снизить долю последних стало возможно путём использования ряда технологий, таких как планетарная галтовка в свободном абразиве [2]; роботизированное шлифование и полирование на многоосевых манипуляторах [3]; безабразивное сухое электрополирование [4]. Рассмотрим подробнее достоинства и ограничения указанных инновационных технологий.

При планетарной галтовке заготовкам сообщается планетарное движение в среде свободного абразива. За счёт наличия тройного вращения последних и их погружения в барабан с неподвижной абразивной смесью одновременно обеспечивается: удаление заусенцев, сглаживание острых кромок, снижение высоты микронеровностей на поверхностях с фасонными профилями. Удаление материала происходит при многократном соударении абразивных частиц с поверхностью заготовки, тем самым реализуются два механизма – резание на микроуровне и формирование напряжений сжатия (наклёп). При трёхстадийной обработке изделий из CoCr (керамические треугольные тела 6×6 мм; абразивонаполненный пластик в форме пирамид 10×10; гранулят оболочки кукурузы или скорлупы грецкого ореха 0,8–1,3 мм, пропитанный алмазным порошком) можно достичь равномерной шероховатости $Ra < 0,05$ мкм.

При галтовке за счёт наличия двух планетарных движений (вращение главного привода и посадочных мест) заготовка перемещается по циклоидальной траектории [5], описываемой в декартовой системе координат параметрическим уравнением:

$$\begin{cases} x = R(\varphi - \sin(\varphi)) \\ y = R(1 - \cos(\varphi)) \end{cases} \quad (1)$$

где R – радиус окружности, образующей циклоиду; φ – угол поворота.

При таком циклоидальном движении (1) обеспечивается равномерная обработка, а путь, пройденный заготовкой за один оборот главного привода, в 4–8 раз больше, чем при движении только по окружности.

В зависимости от модификации оборудования одновременно в планетарной галтовке можно обрабатывать 9, 15 или 24 эндопротеза из CoCr (табл. 1). При этом износ абразивной смеси происходит незначительно: для керамики – 1,85–5,66 кг/ч; для пластика – 0,69–2,15 кг/ч; для гранулята – 0,08–0,62 кг/ч. ричём компенсация износа обеспечивается постоянным перемешиванием и своевременной досыпкой абразива с просеиванием частиц, имеющих размер менее 20% от размеров исходного абразива.

Таблица 1

Состав и физико-механические свойства сплава CoCr

Co, %	Cr, %	Mo и W, %	Si, Mn, Fe, %	Твёрдость HV, МПа	Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа
64	21	6	остальное	286–295	194–200	524–550



Рис. 1. Внешний вид бедренного компонента эндопротеза коленного сустава из CoCr:
a – после чистового фрезерования; *b* – после планетарной галтовки

Fig. 1. External view of the femoral component of the knee joint endoprosthesis made of CoCr:
a – after finishing milling; *b* – after drag finishing

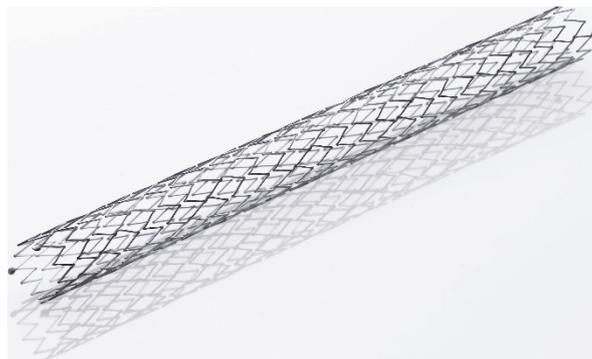


Рис. 2. Внешний вид аортокоронарного стента

Fig. 2. Appearance of aortic coronary stent

Таблица 2

Состав и физико-механические свойства нитинола марки ТН-10

Ni, %	Ti, %	Fe, %	Mo, %	Плотность, г/см ³	Модуль Юнга, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Твёрдость HRC	Относительное удлинение, %
55	50	0,5	2	6,44	210	450	630–650	26–28	12–13

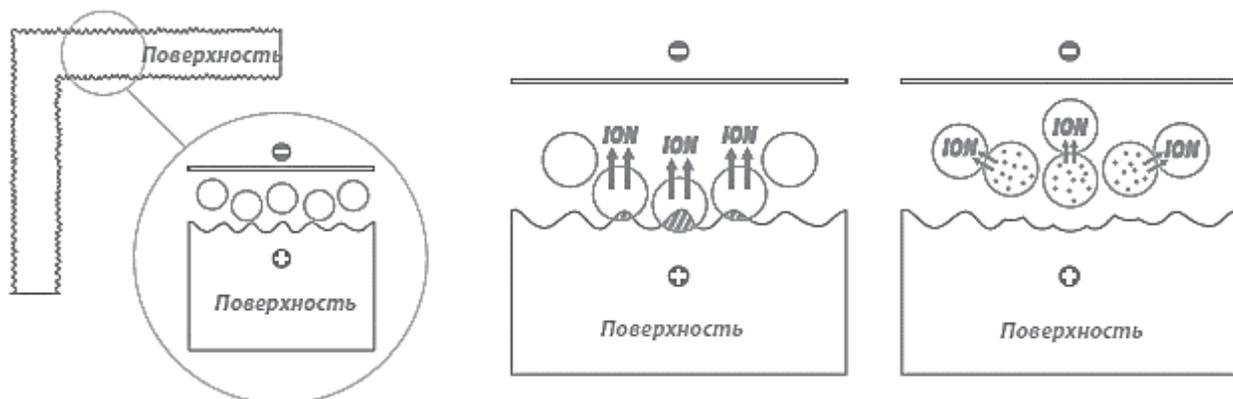


Рис. 3. Схематичное представление процесса съёма материала при сухой электролитической обработке

Fig. 3. Schematic representation of the material removal process by dry electrolytic treatment

Исследование отделочной обработки выполняли с использованием промышленного оборудования мод. DF-3 Pharma фирмы OTEC (Германия) с одновременным закреплением 9 заготовок (рис. 1), прошедших предварительное чистовое фрезерование (исходная шероховатость Ra 1,54).

Обработка выполнялась в следующей последовательности. Шаг 1 – галтовка в керамическом абразиве в течение 2 ч. Шаг 2 – галтовка в пластиковом абразиве в течение 30 мин. Шаг 3 – галтовка в грануляте оболочки кукурузы с алмазной пропиткой в течение 30 мин. Сканирование топографии поверхности и вычисление шероховатости выполнялось на микроскопе мод. Nanofocus 3D Topometrie (Германия) по ISO 21920-2:2021.

Также низкая технологичность отделочной обработки присуща изделиям, применяемым, например, для хирургических операций на сосудах (рис. 2).

К числу последних относятся стенты из нитинола (табл. 2), получаемые из тонкостенной трубы путём высокоточной лазерной резки с последующей вытяжкой или гибкой.

Такие изделия в процессе лазерной резки имеют поверхностные дефекты в виде окалины на кромках, а их конструкции свойственна малая жёсткость из-за наличия тонких конструктивных элементов. В этой связи обработка таких изделий путём применения абразивных технологий становится невозможной.

Выполнить отделочную обработку стентов возможно за счёт применения жидкостного [6, 7] или сухого электролитического полирования [8–10]. При классическом (жидкостном) электрополировании кислотный раствор контактирует как с вершинами, так и с впадинами шероховатости, поэтому происходит воздействие по всей поверхности. В процессе такого полирования выступы шероховатости получают больше электрической энергии, что ускоряет их окисление, а растворение оксидов во впадинах шероховатости ограничено из-за меньшей скорости диффузии. Чтобы уменьшить разницу между выступами и впадинами для создания «гладкой» поверхности, необходимо растворить количество металла, значительно превышающее теоретический минимум. Также имеет место то, что границы, кромки и геометрические вершины обрабатываемых заготовок получают больше электричества, что приводит к риску возникновения чрезмерного растворения металла и, как следствие, снижению изначальной формы геометрических элементов.

Исключить указанные выше негативные явления становится возможным за счёт сухого электролитического полирования [11]. В этом процессе обрабатываемая среда формируется из множества гранул сферической формы из непроводящего полимерного материала, который способен удерживать жидкий электролит без возможности его выхода наружу.

При контакте с поверхностью сфера может соприкоснуться только с выступом шероховатости, и только в этих точках контакта происходит окисление и удаление металла. Таким образом, полирование является очень избирательным и позволяет сохранить геометрию детали. В качестве рабочей среды выступают пористые гранулы размером от 0,05 до 0,6 мм. Процесс сухого электролитического полирования основывается на механизме ионного переноса обрабатываемого материала с пиков (выступов) шероховатости на внутреннюю поверхность гранул ионнообменной смолы, изготовленной из раствора полистиролсульфоновой, серной и других кислот [8, 9]. При данном способе обрабатываемая заготовка подключается к аноду, а электропроводящие гранулы – к катоду. Последним сообщается вибрационное движение, обеспечивающее перемешивание гранул и интенсификацию процесса полирования (рис. 3).

Для реализации сухого полирования заготовок стентов из нитинола использовали установку DLYte 10D фирмы GPAINNOVA (Испания) и режимы, приведенные в табл. 3. Продолжительность обработки составляла 60 мин.

Для реализации сухого полирования заготовок стентов из нитинола использовали установку DLYte 10D фирмы GPAINNOVA (Испания) и режимы, приведенные в табл. 3. Продолжительность обработки составляла 60 мин.

Таблица 3

Режимы процесса сухого полирования

Напряжение анода, В	Длительность импульса P+, мс	Длительность импульса T+, мс	Длительность импульса P-, мс	Длительность импульса T-, мс	Дистиллированная вода
15–25	10	10	10	30	Нет

На практике существенные сложности при реализации отделочной обработки возникают при изготовлении изделий из оксидной керамики, например, на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием [12]. Это связано с высокой твёрдостью и химической инертностью материала (табл. 4). Стоит отметить, что данный материал, обладая повышенной твёрдостью, имеет прочностные характеристики, сравнимые с некоторыми марками однокарбидных твёрдых сплавов (группа WC).

Таблица 4

Физико-механические свойства диоксида циркония

Прочность при изгибе, МПа	Модуль упругости, ГПа	Твёрдость HV, ГПа	Трещиностойкость, МПа·м ^{0,5}
550–750	310–340	15–17	7,0–11,0

К числу изделий из диоксида циркония, изготавливаемых в медицинских целях, относятся зубные

протезы (одинарные и мостовые) и эндопротезы суставов малых конечностей. Традиционно их полировку выполняют вручную с применением войлочных головок, пропитанных алмазными пастами различной дисперсности. Такой вид обработки является весьма непроизводительным и характеризуется отсутствием автоматизации.

Повысить производительность и повторяемость полирования медицинской керамики возможно за счёт применения ротационной галтовки в среде специальных абразивных наполнителей. Суть технологии заключается в интенсивном перемешивании заготовок внутри камеры с галтовочными телами. Привод, сообщающий движение смеси, расположен на дне контейнера, потому образующийся поток имеет форму тора в сечении. Это позволяет заготовкам перемещаться внутри всего рабочего объёма, а за счёт соударения с галтовочными телами происходит процесс съёма материала.

В качестве образцов для полирования использовали заготовки эндопротезов из диоксида циркония (рис. 4). Обработку осуществляли на установке CF-18-I фирмы ОТЕС в среде фарфоровых галтовочных тел и замкнутом цикле галтовки в течение 12 ч. Каждые 2 ч в камеру подавался водный раствор компаунда-шампуня, служащего для формирования пульпы и охлаждения контейнера. В начале процесса и через 6 ч работы в смесь добавляли 20 г карбида кремния зелёного зернистостью F400, обеспечивающего шаржирование галтовочного материала.

Результаты и обсуждение

Измерение шероховатости поверхности при планетарной галтовке эндопротезов из CoCr показало, что в течение 3 ч машинного времени можно достичь среднего значения высоты неровностей Ra 0,016 (рис. 5).



Рис. 4. Внешний вид заготовки эндопротеза, прошедшего механическую и абразивно-струйную обработку до галтовки

Fig. 4. Appearance of the endoprosthesis blank that has undergone mechanical and abrasive blasting before tumbling

Формирование профиля шероховатости происходит при одновременном действии резания и поверхностно-пластической деформации, сопровождающейся формированием остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое. При выполнении цикла буксирной галтовки керамики на профиле шероховатости наблюдается полное сглаживание периодического профиля, оставленное с предыдущей операции чистового фрезерования (рис. 5, *a, b*). Затем при обработке в пластике скорость съёма материала замедляется в 5-6 раз, а при окончательном полировании в грануляте формируются поверхности с высокими отражательными свойствами и весьма низкой шероховатостью (рис. 5, *c, d*). При этом съём материала, измеренный по нормали между эквидистантами исходной и обработанной поверхности, не превышает 0,1 мм, что укладывается в поле допуска на линейные размеры и форму фасонной поверхности эндопротеза коленного сустава.

Сравнительные фотографии стентов из нитинола до и после полирования приведены на рис. 6.

В ходе сухого электролитического полирования за 60 мин изменение параметров шероховатости Ra и Rz происходит согласно графику на рис. 7.

Аппроксимировать экспериментальные кривые можно степенной (формула 2 для Ra) и полиномиальной (формула 3 для Rz) функциями:

$$Ra = 0,0119 \cdot t^2 - 1,2734 \cdot t + 47,204, \quad (2)$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0,9946$.

$$Rz = 8,5811 \cdot t^{0,302}, \quad (3)$$

коэффициент детерминации $R^2 = 0,9371$.

Результаты качественного изменения внешнего вида и шероховатости поверхности после ротационной галтовки образцов из диоксида циркония приведены на рис. 8.

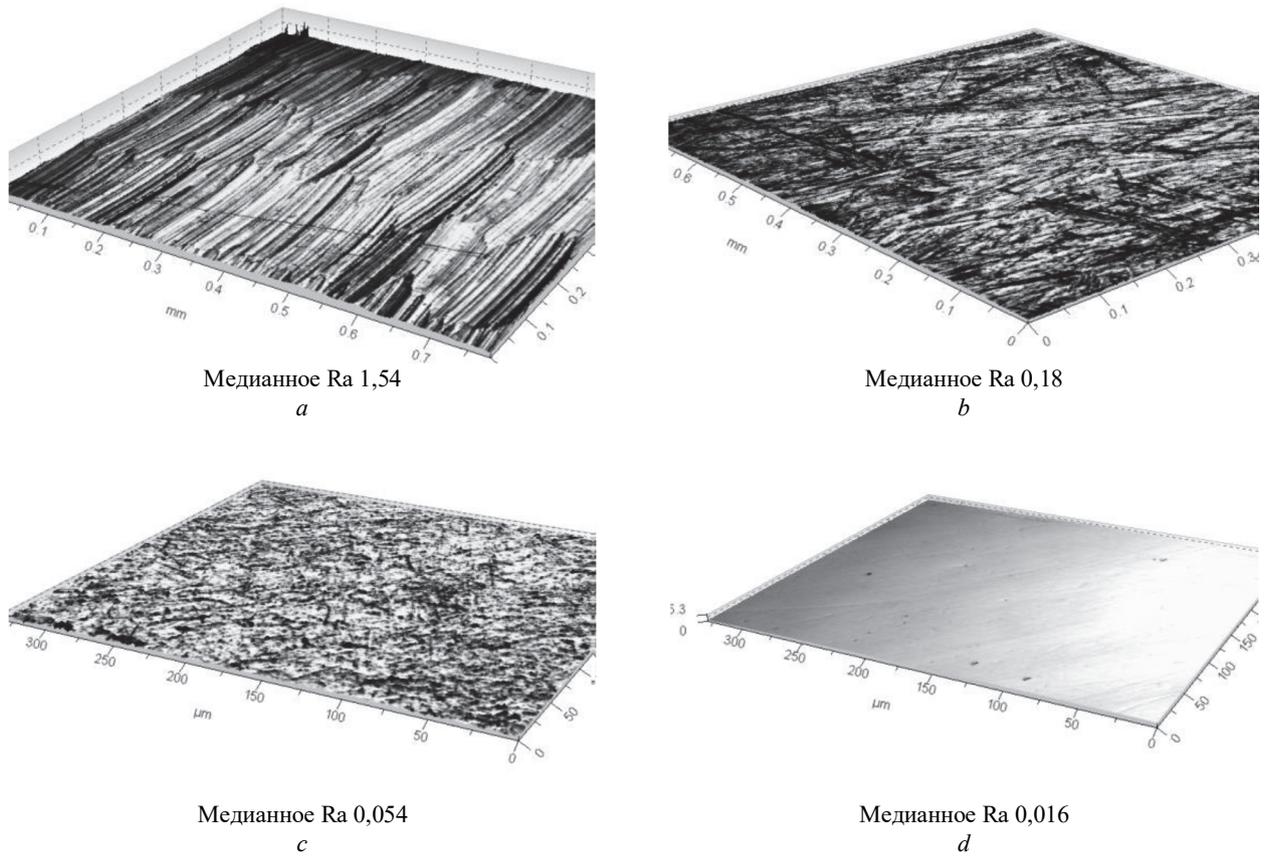


Рис. 5. Топография шероховатости поверхности эндопротеза коленного сустава: *a* – после чистового фрезерования; *b-d* – после планетарной галтовки в керамике, пластике и в грануляте оболочки кукурузы, импрегнированной алмазным порошком, соответственно

Fig. 5. Topography of surface roughness of knee joint endoprosthesis: *a* – after finishing milling; *b-d* – after drag finishing in ceramic, plastic and corn shell granulate impregnated with diamond powder, respectively

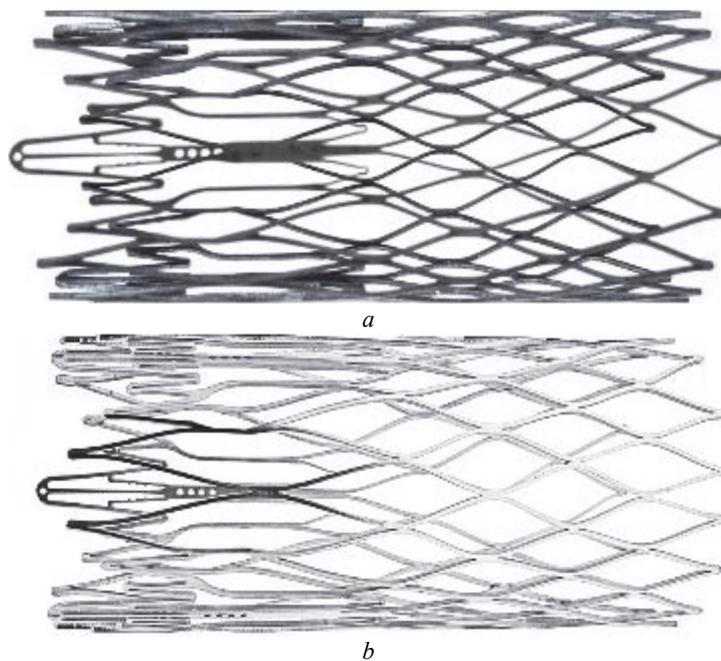


Рис. 6. Внешний вид стентов из нитинола: *a* – до полирования; *b* – после сухого электролитического полирования

Fig. 6. Appearance of nitinol stents: *a* – before polishing; *b* – after dry electrolytic polishing

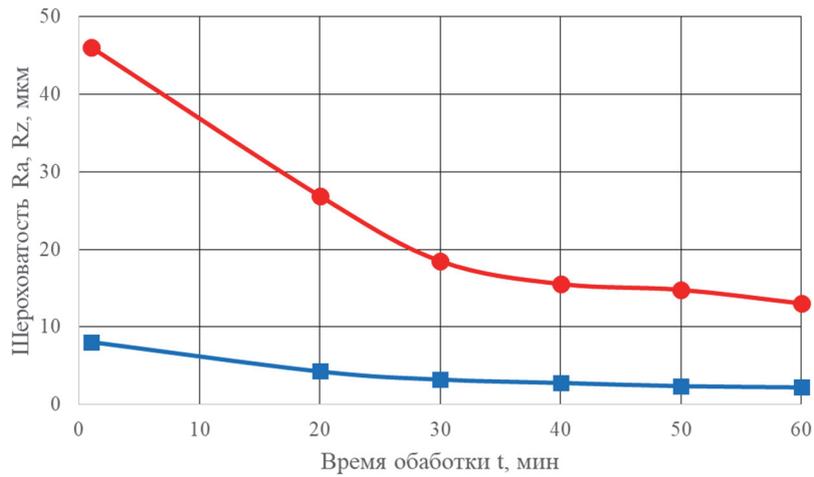


Рис. 7. График изменения параметров шероховатости Ra (■) и Rz (●) в течение времени обработки
 Fig. 7. Graph of change of roughness parameters Ra (■) and Rz (●) during machining time

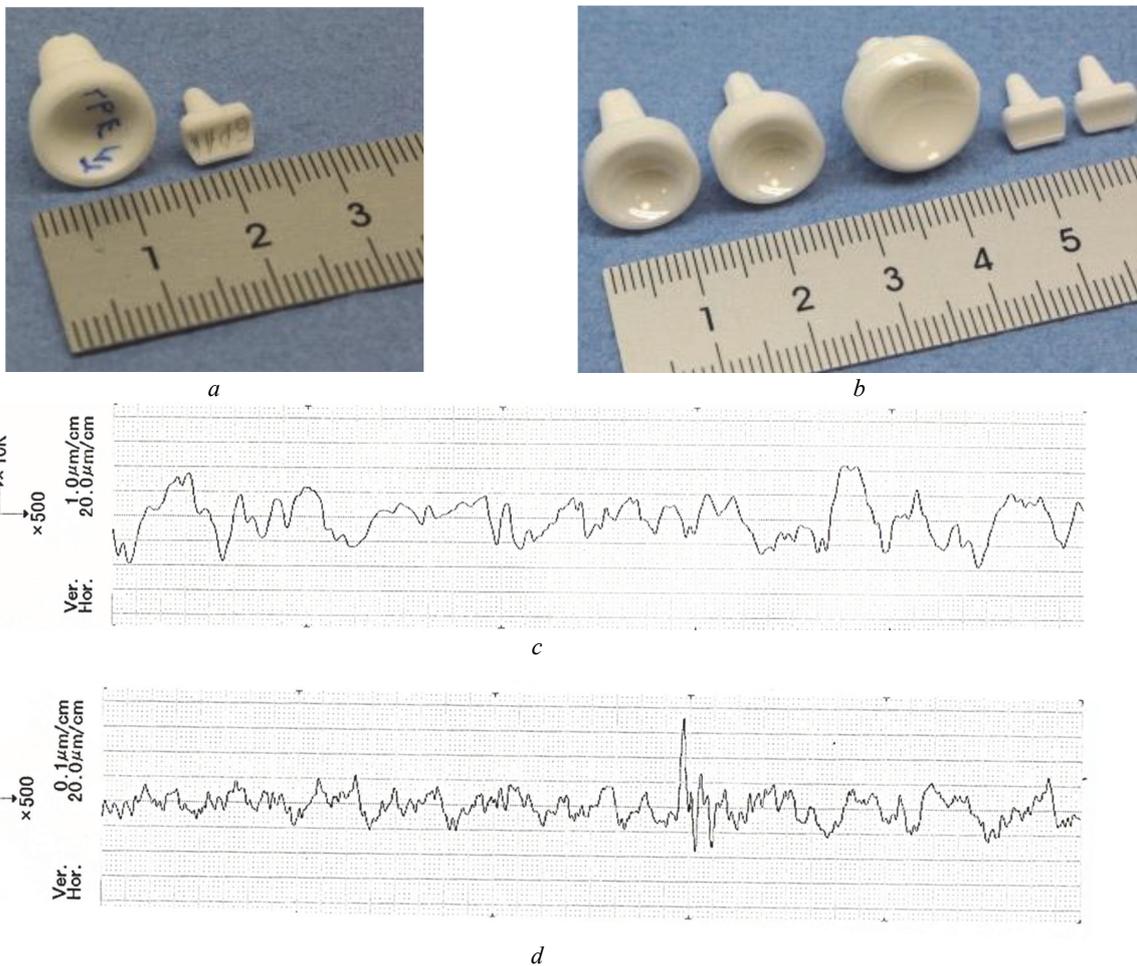


Рис. 8. Внешний вид и профилограммы шероховатости поверхности заготовок эндопротезов из диоксида циркония: *a, c* – до галтовки; *b, d* – после галтовки
 Fig. 8. Appearance and profilograms of surface roughness zirconium dioxide endoprosthesis blanks: *a, c* – before tumbling; *b, d* – after tumbling

Измерения шероховатости показали, что в течение 12 ч ротационной галтовки в замкнутом цикле можно достичь стабильного значения Ra 0,02 мкм как на криволинейных, так и на плоских поверхно-

стях. Указанная величина шероховатости способствует снижению коэффициента трения и минимизации продолжительности приработки поверхностей.

Заключение

Выполнение отделочной обработки сплавов и материалов медицинского назначения является задачей повышенной сложности в случае, когда требуется обеспечить высокую производительность и при этом сохранить качество обработки и минимизировать долю брака. К числу современных методов обработки изделий относят технологические приёмы, основанные на применении как абразивных, так и безабразивных методов. Выбор технологии зависит прежде всего от особенностей поведения материала в обрабатываемой среде, а также требований, предъявляемых к нему конструкцией и качеством поверхностного слоя.

Рассмотренные в работе и апробированные на практическом опыте технологии на базе модернизированных методов галтовки и технология сухого электролитического полирования позволяют проводить отделочную обработку таких медицинских сплавов, как CoCr, титанол и керамики на основе диоксида циркония. Установлено, что путём подбора технологических режимов достигаются весьма стабильные малые значения шероховатости поверхности (Ра менее 0,02 мкм), причём съём материала может быть контролируемым. В отношении нежестких конструкций, таких как стенты, полировку эффективнее выполнять с применением безабразивных методов с применением электрополирования в сухой среде.

Список источников

1. *Машиков А.Н., Нестеров С.А., Рыков И.С.* Разработка конструкции и технология изготовления протеза коленного сустава с применением программ фирмы Delcam // САПР и графика. 2014. № 1. С. 82–85.
2. *Лаптев Н.В., Бабаев А.С.* Моделирование траекторий движения режущих инструментов при обработке методом буксирного полирования // Сборник трудов XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Молодёжь и современные информационные технологии». Томск : Томский политехнический университет, 2018. С. 257–258.
3. *Бабаев А.С., Лаптев Н.В., Столов Е.В., Семёнов А.Р.* Применение роботизированной финишной обработки в свободном абразиве для алюминиевых цилиндров // Актуальные проблемы в машиностроении. 2018. Т. 5, № 1-2. С. 31–36.
4. *Курютцев С.В., Гирфанова А.Г.* Методы снижения шероховатости выращенных деталей, основанные на анодно-катодных процессах // Тексты докладов участников Международной молодёжной научной конференции «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)». 2019. Т. I. С. 559–561.
5. *Демме А.* Циклоидальные кривые или трохойды // Математическое просвещение. 1937. № 11. С. 19–28.
6. *Гриликес С.Я.* Обезжиривание, травление и полирование металлов. М. : Машиностроение, 1983. 112 С.
7. *Добрынин Д.А.* Электролитно-плазменное полирование титановых сплавов VT6 и VT8M-1 // Труды ВИАМ. 2017. № 7, вып. 55. С. 14–23. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-2-2
8. *Millet P.S.* Use of H2SO4 as electrolyte in processes for smoothing and polishing metals by ion transport via free solids / Patent No. 10975491 United States. № PCT/ES2019/070027, publication date 13.04.2021.
9. *Millet P.S.* Use of sulfonic acids in dry electrolytes to polish metal surfaces through ion transport. Patent No. 10975491 United States. № US 2020/0270763, publication date 03.06.2020
10. *Soto Marc Hernandez, Marc Sarsanedas Gimpera, Pau Romagosa Calatayud, M.F. Perez Planas, Edurne Galindo Sesé, Laia Fontelles Batalla* Method and device for dry treatment of metal surfaces by means of electrically active solid particles. Applic. WO2021019121A1, PCT/ES2020/070499, publication date 02.04.2021
11. Патент № 2697757 Российская Федерация. Способ сухого локального электрополирования лопаток блиска и рабочий контейнер для его реализации / Мингажев А.Д., Крюни Н.К., Мингажева А.А. № 2018139190, з а я в л. 06.11.2018; опубл. 19.08.2019. Бюл. № 23. 15 с.
12. *Жигачев А.О., Головин Ю.И., Умрихин А.В., Коренков В.В., Тюрин А.И., Родаев В.В., Дьячек Т.А.* Керамические материалы на основе диоксида циркония. М. : Техносфера, 2018. 356 с.

References

1. Mashkov, A.N., Nesterov, S.A. & Rykov, I.S. (2014) Design development and manufacturing technology of knee joint prosthesis using Delcam software. *CAD and graphics*. 1. pp. 82–85. (In Russian).
2. Laptev, N.V. & Babaev, A.S. (2018) Modeling of the cutting tools motion trajectories at machining by tow polishing method. In: *Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth and Modern Information Technologies"*. Tomsk : National Research Tomsk Polytechnic University. pp. 257–258.
3. Babaev, A.S., Laptev, N.V., Stolor, E.V. & Semenov, A.R. (2018) Application of robotized finish treatment in a free abrasive for aluminum cylinders. *Actual problems in machine building*. 5 (1-2). pp. 31–36. (In Russian).
4. Kuryntsev, S.V. & Girfanova, A.G. (2019) Methods to reduce the roughness of the grown parts based on anodic-cathodic processes. In: *International Youth Scientific Conference "XXIV Tupolev Readings (School of Young Scientists)" : conference proceedings*. I. pp. 559–561. (In Russian).
5. Demme, A. (1937) Tsikloidal'nye krivye ili trokhoidy [Cycloidal curves or trochoids]. *Mathematical Education*. 11. pp. 19–28. (In Russian).
6. Griliches, S.Y. (1983) *Obezzhirivanie, travlenie i polirovanie metallov* [Degreasing, etching and polishing of metals]. Moscow : Mashinostroenie.
7. Dobrynin, D.A. (2017) Electrolyte-plasma polishing of titanium alloys VT6 and VT8M-1. *Proceedings of VIAM*. 7(55). pp. 14–23. (In Russian). doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-7-2-2
8. Millet, P.S. (2021) Use of H2SO4 as electrolyte in processes for smoothing and polishing metals by ion transport via free solids. Patent No. 10975491 United States. № PCT/ES2019/070027, publication date 13.04.2021.

9. Millet, P.S. (2020) Use of sulfonic acids in dry electrolytes to polish metal surfaces through ion transport. Patent No. 10975491 United States. № US 2020/0270763, publication date 03.06.2020.
10. Soto Hernandez M., Sarsanedas Gimpera M., Romagosa Calatayud P., Perez Planas M.F., Galindo Sesé E. & Fontelles Batalla L. (2021) Method and device for dry treatment of metal surfaces by means of electrically active solid particles. Appl. WO2021019121A1, PCT/ES2020/070499, publication date 02.04.2021.
11. Mingazhev, A.D., Krioni, N.K. & Mingazheva, A.A. (2019) Sposob suhogo lokal'nogo elektropirovaniya lopatok bliska i rabochij kontejner dlya ego realizacii [Method of dry local electropolishing of blisk blades and working container for its realization]. Patent No 2697757 Russian Federation. № 2018139190, appl. 06.11.2018; publication date 19.08.2019. Bul. No. 23.
12. Zhigachev, A.O., Golovin, Y.I., Umrikhin, A.V., Korenkov, V.V., Tyurin, A.I., Rodaev, V.V. & Dyachek, T.A. (2018) *Keramicheskie materialy na osnove dioksida tsirkoniia* [Ceramic materials based on zirconium dioxide]. Moscow : Technosphere.

Информация об авторах:

Бабаев Артём Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск Россия). E-mail: a.s.babaev@mail.tsu.ru. ORCID 0000-0003-2334-1679; Web of Science ID: N-1472-2016; Scopus ID: 55647175700; РИНЦ: 739232.

Марченко Екатерина Сергеевна – доктор физико-математических наук, доцент, заведующая лабораторией сверхэластичных биоинтерфейсов Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: 89138641814@mail.ru. ORCID 0000-0003-4615-5270, Web of Science ID: E-9914-2017, Scopus ID: 24832211500, РИНЦ: 581848.

Семёнов Артём Романович – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: a.r.semenov@mail.tsu.ru. ORCID 0000-0002-8663-4877; Web of Science ID: HSE-8277-2023; Scopus ID: 58429868000; РИНЦ: 1236024.

Гарин Александр Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник лаборатории сверхэластичных биоинтерфейсов Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: stik-020@mail.ru. ORCID 0000-0001-9853-2766, Web of Science ID: I-9622-2018, Scopus ID: 57203415842, РИНЦ: 983256.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Babaev Artem S., Cand.Sc. (Engineering), Senior Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: a.s.babaev@mail.tsu.ru; ORCID 0000-0003-2334-1679; Web of Science ID: N-1472-2016; Scopus ID: 55647175700.

Marchenko Ekaterina S., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laboratory, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: 89138641814@mail.ru; ORCID 0000-0003-4615-5270, Web of Science ID: E-9914-2017, Scopus ID: 24832211500.

Semenov Artem R., Postgraduate Student, Junior Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: a.r.semenov@mail.tsu.ru; ORCID 0000-0002-8663-4877; Web of Science ID: HSE-8277-2023; Scopus ID: 58429868000.

Garin Aleksander S., Postgraduate Student, Junior Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: stik-020@mail.ru; ORCID 0000-0001-9853-2766, Web of Science ID: I-9622-2018, Scopus ID: 57203415842.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 04.08.2024; одобрена после рецензирования 10.09.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 04.08.2024; approved after reviewing 10.09.2024; accepted for publication 30.10.2024

Вызовы мировой политики

Научная статья
УДК 327.7
doi: 10.17223/29491665/6/7

Организация Договора о коллективной безопасности в современных условиях (2022–2023 гг.)

Троицкий Евгений Флорентьевич¹, Юн Сергей Миронович²

^{1,2} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *eftroitskiy@yandex.ru*

² *sergey.yun@mail.tsu.ru*

Аннотация. В работе рассматривается влияние международного кризиса 2022–2023 гг. на Организацию Договора о коллективной безопасности (ОДКБ) и перспективы развития ОДКБ. Для этого проводится анализ институционально-правового и функционального развития ОДКБ в условиях кризиса; рассматривается влияние кризиса на существовавшие хронические проблемы внутри ОДКБ и на появление новых противоречий; формулируются возможные сценарии дальнейшей трансформации ОДКБ.

Ключевые слова: ОДКБ, Россия, Казахстан, Армения, Белоруссия, Кыргызстан, Таджикистан, безопасность, международный кризис

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Троицкий Е.Ф., Юн С.М. Организация Договора о коллективной безопасности в современных условиях (2022–2023 гг.) // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 59–69. doi: 10.17223/29491665/6/7

Original article
doi: 10.17223/29491665/6/7

The Collective Security Treaty Organization in the Contemporary World (2022–2023)

Evgeny F. Troitskiy¹, Sergey M. Yun²

^{1,2} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *eftroitskiy@yandex.ru*

² *sergey.yun@mail.tsu.ru*

Abstract. The paper focuses on the impact of the 2022–2023 international crisis on the Collective Security Treaty Organization (CSTO) and prospects for its development. For this purpose, the analysis of the institutional development of the CSTO is carried out; the impact of the crisis on existing chronic problems within the CSTO and on the emergence of new contradictions is considered; possible scenarios for further transformation of the CSTO are formulated. The study is based mainly on a source base, which includes official documents, materials and statements of the CSTO and its member states, and news materials from various information resources. To conduct the study, foreign policy behavior methods and scenario analysis and were used.

In 2022–2023 in the context of an unprecedented international crisis, the CSTO member states were able to continue interaction in four main areas, including administrative activities, rule-making, organization of joint exercises and personnel training, and foreign policy cooperation. At the same time, the Ukrainian crisis became one of the factors that contributed to the aggravation of problems within the CSTO. The inability of the CSTO to ensure real coordination of the foreign policy of the member states became obvious: the allies, with the exception of Belarus, did not express solidarity with Russia on the situation in Ukraine. Azerbaijan's military operations in Nagorno-Karabakh once again pointed to the lack of consensus in the CSTO on issues of ensuring the security of Armenia and Yerevan's deep dissatisfaction with the activities of the Organization. There are still contradictions between Tajikistan and Kyrgyzstan. The Afghan problem is a serious external threat, to which the CSTO countries have yet to develop an effective collective response.

Based on such parameters as the composition of the Organization and the degree of foreign policy coordination implemented by the allies, four scenarios for the evolution of the CSTO were identified. Of these, the most likely scenario is the "inertia" scenario, which is characterized by maintaining the composition of the CSTO and a further decrease in the degree of foreign policy

coordination. In this scenario, Armenia retains formal membership in the Organization, effectively freezing participation in its activities. Foreign policy coordination is increasingly reduced to general statements. The organization continues to move along the established trajectory, but movement due to inertia, as we know, cannot help but slow down.

In general, during the crisis of 2022-2023 the CSTO's line of maintaining neutrality regarding the Ukrainian crisis, searching for minimal points of contact in the interests of the member states and progressively promoting cooperation in traditional areas are the optimal tactics. However, an obvious problem is the lack of a long-term development strategy for the organization. Intensifying cooperation in this area should become the main task for Russian policy towards the CSTO.

Keywords: CSTO, Russia, Kazakhstan, Armenia, Belarus, Kyrgyzstan, Tajikistan, security, international crisis

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Troitsky, E.F. & Yun, S.M. (2024) The Collective Security Treaty Organization in the Contemporary World (2022-2023). *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 59–69. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/7

Введение

Организация Договора о коллективной безопасности (ОДКБ) – военно-политический союз России, Армении, Беларуси, Казахстана, Кыргызстана и Таджикистана и единственная на постсоветском пространстве структура, предоставляющая странам-членам гарантии взаимной военной помощи и политической поддержки в случае внешней агрессии.

Вместе с тем задача развития Организации в качестве «ключевого инструмента поддержания стабильности и обеспечения безопасности на пространстве СНГ», поставленная в Концепции внешней политики РФ от 2008 г. [1], не только не была реализована, но и перестала декларироваться в качестве внешнеполитического приоритета в Концепциях 2013, 2016 и 2023 гг. Отклонение в конце 2021 г. Западом предложенных Россией проектов новых договоренностей в сфере общеевропейской безопасности, спровоцировавшее начало Специальной военной операции (СВО) на Украине, привело к фактически прямому противостоянию России и западных стран. На фоне растущей геополитической напряженности развитие получил и конфликт Армении и Азербайджана вокруг Нагорного Карабаха.

Все эти события дополнительно усложняют условия развития ОДКБ и ставят под угрозу эффективность принятия решений в Организации. В Концепции внешней политики РФ 2023 г. в качестве одного из приоритетов формулируется «укрепление потенциала и повышение международной роли ОДКБ» в целом, подчеркивается «антикризисный и миротворческий» потенциал объединения, его роль в обеспечении биологической безопасности [2]. В текущих условиях задачей Москвы становится сохранение и развитие ОДКБ, остающейся для России инструментом поддержания лидерства в формирующейся евразийской подсистеме международных отношений. Данное исследование обращается к ключевым аспектам деятельности ОДКБ в условиях кризиса миропорядка 2022–2023 гг. с целью определить влияние

международного кризиса на организацию и перспективы ее развития. Для этого в работе реализуются следующие задачи: проанализировать институционально-правовое и функциональное развитие ОДКБ в условиях кризиса; рассмотреть влияние кризиса на существовавшие хронические проблемы внутри ОДКБ и появление новых противоречий; определить контуры возможных сценариев дальнейшей трансформации ОДКБ.

Исследование построено главным образом на источниковой базе, которая включает официальные документы и материалы ОДКБ, размещенные на сайте Организации, документы и заявления руководства и представителей ведомств стран ОДКБ, новостные материалы информационных ресурсов РБК, Интерфакс, Russia Today, Коммерсантъ, БЕЛТА, Forbes. Для проведения исследования использовались методы анализа внешнеполитического поведения и построения сценариев.

Адаптация ОДКБ к новым реалиям

Украинский кризис, переросший в феврале 2022 г. в масштабный конфликт, существенно изменил международно-политические и военно-стратегические условия деятельности ОДКБ. Влияние событий 2022 г. на геополитическую конъюнктуру можно обобщить в несколько основных выводов, необходимых для понимания внешнеполитического контекста, в котором функционирует Организация.

Во-первых, эскалация ситуации на Украине стала квинтэссенцией кризиса миропорядка, сложившегося после окончания «холодной войны». В ходе конфликта США и их союзники рассчитывали на военное поражение и экономическое истощение России. Москва, в свою очередь, продемонстрировала готовность и способность эффективно справляться с высокими издержками для достижения целей в области внешней политики и национальной безопасности. Во-вторых, украинский конфликт привел к дальнейшему сближению России и Китая.

В условиях системных противоречий между РФ и западными странами отношения «всеобъемлющего партнерства и стратегического взаимодействия в новую эпоху» смогли перерасти в надежный межгосударственный союз, в то время как взаимодействие Пекина и Вашингтона сохраняет негативную динамику.

В-третьих, конфликт вокруг Украины способствовал укреплению роли Турции в качестве регионального и глобального игрока. В нынешних условиях Анкара получила новые возможности для проведения более независимой внешнеполитической линии, одновременно усилив собственный статус в НАТО и сохранив конструктивные отношения с Россией, упрочив свои позиции в Закавказье и в Центральной Азии. Наконец, ситуация на Украине продемонстрировала неэффективность международных и западных институтов, созданных для предотвращения и урегулирования подобных ситуаций, и поставила под сомнение надежность многосторонних договоренностей, хрупкость казавшихся незыблемо прочными норм и правил.

В современных условиях принципиальным вызовом для ОДКБ стало поддержание функционирования в текущем членском составе. В Заявлении, подписанном лидерами стран ОДКБ в мае 2022 г. в связи с 30-летием Ташкентского договора и 20-летием Организации, отмечалось значение усилий государств-членов в поддержании мира и безопасности на евразийском пространстве, подчеркивались намерения ОДКБ по дальнейшему совершенствованию структуры и расширению деятельности по основным направлениям [3].

В 2022–2023 гг. в условиях беспрецедентного международного кризиса государства – члены ОДКБ смогли продолжить взаимодействие по четырем основным направлениям, включающим административную деятельность, нормотворчество, организацию совместных учений и подготовку кадров, внешнеполитическое сотрудничество.

Так, в рамках первого блока задач в декабре 2022 г. впервые состоялось заседание нового рабочего органа ОДКБ – Координационного совета по вопросам биологической безопасности. Было принято решение о синхронизации сроков председательства стран-членов в СКБ с календарным годом. В июле 2023 г. прошла встреча руководителей органов управления связью министерств обороны стран-участниц, на которой, в частности, обсуждалась возможность выработки единых стандартов и протоколов в сфере военного строительства.

В 2022 г. была дополнена и расширена нормативно-правовая база деятельности ОДКБ. В ноябре на сессии СКБ в Ереване были приняты важные решения для дальнейшего развития военного потенциала:

«О совместном формировании радиационной, химической, биологической защиты и медицинского обеспечения», «Об оснащении Миротворческих сил ОДКБ современными вооружениями, военной и специальной техникой, специальными средствами» и «Положение о системе связи ОДКБ» [4]. Комплекс оперативно-профилактических мероприятий «Наемник», направленный на борьбу с вербовкой граждан террористическими организациями, получил статус региональной антитеррористической операции постоянного действия. В марте 2023 г. вступило в силу соглашение по вопросам юрисдикции и оказания правовой помощи по делам, связанным с временным пребыванием сил и средств системы коллективной безопасности на территориях государств-членов. В ноябре 2023 г. на сессии СКБ в Минске было принято решение «О мерах по развитию системы кризисного реагирования ОДКБ». Также по мере ратификации внутри стран – участниц объединения начнут действовать подписанные в 2021 г. соглашение о совместном материально-техническом и медицинском обеспечении коллективных сил ОДКБ и протокол к соглашению о миротворческой деятельности ОДКБ, регламентирующий понятие «координирующее государство».

Третье направление сотрудничества в рамках Организации на современном этапе включает расширение перечня совместных учений. В сентябре–октябре 2022 г. в Казахстане прошли учения КСОР ОДКБ «Взаимодействие-2022», «Поиск-2022» и «Эшелон-2022», в Таджикистане – учения КСБР «Рубеж-2022». В 2023 г. страны объединения договорились о проведении учений на территории Белоруссии (учения КСОР «Взаимодействие-2023», учения подразделений разведки «Поиск-2023», учения подразделений материально-технического обеспечения коллективных сил ОДКБ «Эшелон-2023», учение с совместным формированием РХБ защиты и медицинского обеспечения «Барьер-2023», специальное учение с подразделениями МЧС «Скала-2023» состоялись в сентябре 2023 г.) и Кыргызстана (учения миротворческих сил ОДКБ «Нерушимое братство-2023» прошли в октябре 2023 г.) [5]. На 2024 г. запланированы боевые учения ОДКБ на территории России, Казахстана, Киргизии и Таджикистана. Важным направлением деятельности ОДКБ в 2022 г. оставалась подготовка военных кадров. На обучение по квоте ОДКБ в 59 военных учебных заведениях России, Белоруссии, Казахстана и Армении были приняты 1871 человек [6] (ранее набор составлял до 2,6 тыс. человек в год).

С учетом современной международной конъюнктуры и отказа многих государств от поддержания отношений с Россией ОДКБ расширяет сотрудничество с заинтересованными странами и организациями вне

Запада. Так, в марте 2023 г. в совместном заявлении по итогам российско-китайской встречи на высшем уровне были отмечены «позитивный вклад Организации... в обеспечение региональной безопасности» и «потенциал для развития сотрудничества между ОДКБ и КНР в целях обеспечения мира и стабильности региона» [7]. Помимо этого, в ноябре 2022 г. на сессии СКБ было принято решение о развитии взаимодействия с Шанхайской организацией сотрудничества (ШОС). По оценке представителей Секретариата ОДКБ, «есть большая перспектива нового формата отношений между ОДКБ и ШОС» [8]. В то же время принципиальные различия между Организацией (ШОС не является военно-политическим альянсом, а один из ее ведущих членов, Индия, имеет статус основного партнера США в области обороны) пока не позволяют увидеть контуры этого «нового формата».

Обострение старых проблем и появление новых противоречий

Украинский кризис стал одним из факторов, способствовавших обострению хронических проблем объединения и выявлению новых противоречий.

Очевидной стала неспособность ОДКБ обеспечить реальную координацию внешней политики стран-участниц: союзники, за исключением Белоруссии, не выразили солидарности с Россией по ситуации на Украине. Усилилась тенденция к использованию членства в ОДКБ как инструмента политического торга и давления на Россию. Так, Кыргызстан отменил запланированные на октябрь 2022 г. командно-штабные учения «Нерушимое братство-2022». Армения тоже воздержалась от участия в учениях ОДКБ в 2022 г., а в январе 2023 г. заявила об отказе проводить на своей территории учения «Нерушимое братство-2023» (в итоге эти учения согласился провести у себя Кыргызстан осенью 2023 г.). В целом, несмотря на различия в оценках внешней политики России, государства – члены ОДКБ заняли сдержанно-нейтральную позицию по украинскому конфликту, что, с одной стороны, позволило поддержать текущую деятельность Организации, с другой – усилило внутреннюю напряженность внутри альянса.

Для России украинский кризис резко повысил значимость военно-политического союза с **Белоруссией**, оказавшейся в непосредственной близости от линии фронта. Само сохранение сложившихся за 30 лет модели белорусской государственности и формата российско-белорусских отношений стало неразрывно связано с исходом украинского конфликта.

В официальной риторике Минск демонстрирует расхождение с Москвой по многим нюансам оценки

ситуации на Украине, однако в целом разделяет позицию РФ и оказывает ей политическую, военную и логистическую поддержку. Важным шагом со стороны Белоруссии, демонстрирующим значение России в качестве стратегического партнера, стало отклонение предложения Киева о заключении «пакта о ненападении» [9]. Решение о размещении в Белоруссии российского ядерного оружия, принятое в марте 2023 г., также подчеркивает высокую стадию военной интеграции между Москвой и Минском. Однако российско-белорусское военно-политическое взаимодействие развивается вне рамок ОДКБ и не способствует непосредственному укреплению объединения. Напротив, подобное сближение вызывает настороженное отношение у других членов Организации. Такие настроения отражает комментарий президента Казахстана о том, что у стран «даже ядерное оружие одно на двоих» [10].

Тем не менее проект новой Концепции национальной безопасности Белоруссии, опубликованный в марте 2023 г., предусматривает готовность страны к активному участию в «деятельности ОДКБ, являющейся неотъемлемой составляющей обеспечения международной и евразийской безопасности», и в повышении «эффективности органов военного управления, сил и средств коллективной безопасности ОДКБ» [11].

Украинский кризис негативно повлиял на и без того сложное стратегическое положение **Армении**. Укрепление региональной и глобальной роли Турции, неготовность России усугублять противоречия с Анкарой и Баку способствовали эскалации конфликтной ситуации на армяно-азербайджанской границе в сентябре 2022 г. и в Лачинском коридоре в декабре 2022 г.

В сентябре 2022 г. в связи с обострением противоречий между Ереваном и Баку состоялась внеочередная сессия СКБ, на которой было принято решение направить миссию ОДКБ во главе с Генеральным секретарем и начальником Объединенного штаба в Армению для оценки ситуации и поручить ее дальнейший мониторинг рабочей группе из сотрудников Секретариата и представителей Объединенного штаба. Реакция на происходящие события внутри государств – членов ОДКБ была неоднозначной: Белоруссия, Казахстан и Кыргызстан обозначили, что не разделяют позицию Армении, а Казахстан и Кыргызстан в качестве членов Организации тюркских государств выразили поддержку Азербайджану.

Шаги, предпринятые ОДКБ, были восприняты Ереваном как недостаточные. В сентябре вопрос 2022 г. о выходе страны из Организации обсуждался на заседании Совета безопасности Армении.

В ноябре 2022 г. премьер-министр страны Н. Пашинян отказался подписывать итоговую декларацию саммита ОДКБ и решение СКБ о совместных мерах по оказанию помощи Армении, предусматривающее размещение миссии наблюдателей ОДКБ на армяно-азербайджанской границе, и потребовал «политической оценки агрессии Азербайджана» [12]. В мае 2023 г. Н. Пашинян констатировал, что объединение само «уходит из Армении», и вновь заявил, что не исключает «приостановления или заморозки членства в ОДКБ» [13]. Миссия ОДКБ в Армении так и не появилась. В начале сентября 2023 г. Армения отозвала своего постоянного представителя при ОДКБ, не назначив преемника.

19–20 сентября 2023 г. Азербайджан провел в Нагорном Карабахе «антитеррористическую операцию», приведшую к разгрому вооруженных сил непризнанной Нагорно-Карабахской Республики (НКР) и началу массового исхода армянского населения из Нагорного Карабаха в Армению. Президент НКР подписал указ о прекращении существования НКР с 1 января 2024 г. Руководство Армении возложило ответственность за события в Карабахе не только на Азербайджан, но и на российский миротворческий контингент, размещенный в непризнанной республике. 24 сентября Пашинян в обращении к нации заявил, что «системы безопасности и союзники, на которых мы надеялись на протяжении многих лет, поставили перед собой задачу выставить напоказ нашу уязвимость и обосновать невозможность армянского народа иметь независимое государство». Лидер Армении подчеркнул необходимость «трансформировать, дополнять и обогащать инструменты внешней и внутренней безопасности Республики Армения» [14].

В результате событий сентября 2023 г. вероятность приостановки Арменией членства в ОДКБ значительно повысилась, однако можно предположить, что Ереван удержат от этого шага опасения за территориальную целостность самой Армении, через территорию которой Азербайджан и Турция намерены проложить Зангезурский коридор, связывающий Азербайджан с Нахичеванской автономией и Турцией. В октябре 2023 г. Пашинян заявил, что страна не выходит из ОДКБ во избежание «недопонимания» и для сверки позиций с другими странами Организации [15]. Тем не менее в ноябре 2023 г. Армения не направила представителей ни на сессию СКБ, ни на совместное заседание Совета министров обороны, Совета министров иностранных дел и Комитета секретарей советов безопасности ОДКБ. По настоянию армянской стороны был снят с рассмотрения проект Заявления министров иностранных дел стран ОДКБ в поддержку усилий по достижению мира на Южном

Кавказе. Ереван проигнорировал и заседание Парламентской ассамблеи ОДКБ в декабре 2023 г.

Для властей **Казахстана** под руководством президента К.-Ж. Токаева украинский кризис в значительной степени осложнил решение внутривосточных проблем и проведение многовекторного внешнеполитического курса. С одной стороны, связанные с событиями января 2022 г. задачи удержания власти, социально-политической консолидации и проведения реформ, обеспечения гарантий для иностранных инвесторов, необходимость смягчения и нивелирования санкционных рисков для экономики Казахстана привели к активизации сотрудничества страны с США и ЕС. С другой стороны, руководство России, оказавшее новому лидеру Казахстана значительную помощь во время внутреннего кризиса января 2022 г. через проведение миротворческой миссии ОДКБ, ожидало, что Астана займет как минимум нейтральную позицию в отношении ситуации на Украине.

Власти Казахстана апеллировали к принципу территориальной целостности и публично отказались признавать независимость ЛНР и ДНР, а также призвали обе стороны к дипломатическому урегулированию и предложили свои посреднические услуги, ссылаясь на «очень хорошие, добрые отношения» как с Украиной, так и с Россией [16]. Также Казахстан, как и большинство других стран ОДКБ, регулярно воздерживался или голосовал против антироссийских резолюций в Генеральной Ассамблее ООН. Однако в апреле 2023 г. страна вместе с Арменией поддержала Резолюцию A/RES/77/284 «Сотрудничество между Организацией Объединенных Наций и Советом Европы», в преамбуле которой содержится положение об «агрессии Российской Федерации против Украины» [17].

В то же время Астана декларировала курс на поддержку «подлинно союзнических отношений стратегического партнерства» [18] с Россией как на двустороннем, так и на многостороннем уровнях, в том числе в рамках ОДКБ. Еще в январе 2022 г. в ответ на развертывание миротворческой операции в Казахстане К.-Ж. Токаев поблагодарил коллег-президентов за «политическое и даже боевое братство», оценил ее как «переломный этап в развитии организации, которая обрела новые качества как сильный международный институт» и обещал, что страна внесет свой вклад в укрепление «мощного потенциала ОДКБ» [19]. Позднее риторика лидера Казахстана в отношении Организации стала более сдержанной, а акцент в его версии приоритетных направлений деятельности ОДКБ был сделан на развитии миротворческого потенциала и вызовах, связанных с ситуацией в Афганистане.

Власти Казахстана не раз публично опровергали слухи о намерении страны выйти из ОДКБ, указывая на то, что членство в объединении полностью отвечает национальным интересам. О стремлении Астаны к дальнейшему укреплению партнерства в рамках ОДКБ свидетельствует готовность к приведению национального законодательства в соответствие с нормативно-правовой базой объединения. В 2023 г. власти Казахстана в том числе ратифицировали Соглашение о совместном материально-техническом и медицинском обеспечении войск ОДКБ от 2021 г. и Протокол о внесении изменений в соглашение о миротворческой деятельности ОДКБ от 2007 г.

С января 2024 г. Казахстан стал председателем в ОДКБ. На сессии Совета коллективной безопасности ОДКБ 23 ноября 2023 г. в Минске президент К.-Ж. Токаев обозначил приоритеты Казахстана на время своего председательства, включая сотрудничество с заинтересованными странами и международными организациями, взаимодействие по вопросам военного сотрудничества (оперативное развертывание коллективных сил, подготовка военных кадров, миротворческий потенциал), борьбу с трансграничными угрозами (международный экстремизм и терроризм, наркотрафик, незаконный оборот оружия и др.) [20]. Среди запланированных на 2024 г. учений сил ОДКБ – учения Миротворческих сил ОДКБ на территории Казахстана.

Власти **Кыргызстана и Таджикистана** также заняли нейтральную позицию по украинскому кризису. При этом риторика Кыргызстана в отношении России можно оценить как в целом положительную. В частности, пост президента страны С. Жапарова, опубликованный в Facebook¹ 22 февраля 2022 г., содержит предположение о том, что признание Россией независимости ЛНР и ДНР стало вынужденной мерой для защиты мирного населения территорий Донбасса, где проживает большое количество российских граждан. Также, по версии российской стороны, 26 февраля 2022 г. в телефонном разговоре с президентом РФ В.В. Путиным глава Кыргызстана отметил ответственность Киева за срыв Минских договоренностей и выразил поддержку решительных действий российской стороны по защите мирного населения Донбасса, что повысило напряженность в дипломатических отношениях Бишкека и Киева.

Дальнейшее развитие комплексных связей с Россией и активное участие в работе институтов и механизмов ОДКБ остается стратегическим приоритетом для Кыргызстана и Таджикистана, поскольку обе стороны заинтересованы в обеспечении собственной национальной безопасности.

Во-первых, на протяжении длительного периода сохраняющаяся напряженность на кыргызско-таджикской границе неоднократно приводила к перестрелкам между военными обеих стран. По данным Секретариата ОДКБ, пограничная проблема неоднократно обсуждалась в том числе и на сессиях СКБ, однако официальные решения по данному вопросу так и не были приняты. В наиболее активную фазу конфликт перешел 14–17 сентября 2022 г. Однако участие объединения в урегулировании повторной эскалации осенью 2022 г. ограничилось телефонными переговорами Генерального секретаря ОДКБ С. Засы с секретарями советов безопасности Кыргызстана и Таджикистана.

С посредническими усилиями выступила Россия: 18 сентября 2022 г. состоялись телефонные переговоры В.В. Путина с президентами конфликтующих стран, 13 октября – очные трехсторонние переговоры в Астане на полях саммита Совещания по взаимодействию и мерам доверия в Азии. На данной встрече Москва планировала предложить урегулирование пограничного вопроса в трехстороннем формате, что вызвало сдержанную реакцию у Душанбе, заинтересованного в двустороннем механизме [21].

Кыргызстан и Таджикистан возобновили переговоры по пограничному конфликту, и на протяжении 2023 г. сторонам удалось согласовать уже более 90% общей границы [22]. Хотя стороны декларируют скорое окончательное решение проблемы, можно предположить, что на повестке остались самые сложные участки, а потому риск обострения вопроса остается актуальным. По-прежнему с апреля 2021 г. не работают пропускные пункты на кыргызско-таджикской границе, закрытые со стороны Кыргызстана.

Во-вторых, для всех центральноазиатских стран ОДКБ важнейшее значение имеет ситуация в Афганистане. Приход к власти движения «Талибан»² в августе 2021 г. обусловил формирование целого комплекса вызовов для региональной безопасности [23]. Особую озабоченность стран Центральной Азии вызывает террористическая угроза. Согласно заявлению президента Таджикистана Эмомали Рахмона на заседании СКБ 10 января 2022 г., в северо-восточных провинциях Афганистана насчитывалось больше 40 лагерей и центров по подготовке террористов, в которых находилось более 6 тыс. боевиков. Э. Рахмон выразил озабоченность в связи с отсутствием целевой межгосударственной программы по укреплению таджикско-афганской границы и призвал к созданию «пояса безопасности» вокруг Афганистана [19]. Регулярные сообщения о перестрелках на таджикско-аф-

¹ Facebook – продукт компании *Meta*, которая признана экстремистской организацией и запрещена в Российской Федерации.

² Движение «Талибан» – организация, деятельность которой запрещена в Российской Федерации.

ганской границе в течение 2022–2023 гг. свидетельствуют об уязвимости национальной безопасности Таджикистана перед внешней угрозой.

Из-за сложности выработки единого курса центральноазиатскими членами ОДКБ оперативная помощь Душанбе со стороны объединения не была оказана. Так, Казахстан, Кыргызстан и Россия формально не признают режим талибов, однако поддерживают с ним связи на официальном уровне и рассчитывают на то, что укрепление движения будет способствовать политической стабилизации в стране. В свою очередь, Таджикистан поддерживает оппозиционный талибам Фронт национального сопротивления Афганистана (ФНСА) во главе с представителем таджикской общины Ахмадом Масудом-младшим.

В то же время усиление афганских ячеек ИГИЛ³ и внутренний кризис в ФНСА все же способствовали сближению позиций стран ОДКБ. В марте 2023 г. делегация талибов впервые посетила Таджикистан и получила под свой контроль консульство в Хороге. 20 июня 2023 г. министры иностранных дел стран ОДКБ приняли совместное заявление о положении в Афганистане. Документ содержит обращение к действующим властям, призыв к международному сообществу продолжить оказание помощи афганскому народу, в том числе в вопросе снятия односторонних санкций, поддержку мер по укреплению участков таджикско-афганской границы и инициативы по созданию «пояса безопасности» вокруг Афганистана [24].

На саммите ОДКБ 16 сентября 2021 г. страны договорились «ускорить работу по принятию предложенной Таджикистаном Целевой межгосударственной программы по укреплению таджикско-афганской границы» [25]. Согласовать документ не удалось, несмотря на то, что его идея была одобрена странами-членами еще в далеком 2013 г. По итогам ноябрьской сессии Совета коллективной безопасности ОДКБ главами государств было дано поручение форсировать решение вопроса, над которым в ОДКБ работает специальная рабочая группа. Ее последнее заседание состоялось в декабре 2023 г., на февраль 2024 г. запланировано следующее заседание группы по доработке Целевой программы. Из-за затягивания вопроса основной безопасности таджикско-афганской границы по-прежнему остается двустороннее взаимодействие России и Таджикистана, которое включает использование сил 201-й российской военной базы в Таджикистане, совместные российско-таджикские учения, поставку российской военной техники для Душанбе. Также в последние годы военно-техническую помощь Таджикистану и Кыргызстану оказывает Казахстан.

Сценарии развития ОДКБ

Для определения сценариев эволюции ОДКБ базовыми параметрами, на наш взгляд, являются состав Организации (состав определяет ее структуру, географические и функциональные направления деятельности) и степень внешнеполитической координации, реализуемой союзниками (ею, в основном, определяются ожидания от Организации и вероятность использования ее потенциала как военно-политического инструмента). Поскольку расширение ОДКБ крайне маловероятно, а сохранение нынешней, весьма низкой степени внешнеполитической координации фактически оборачивается ее дальнейшим снижением, можно выделить следующие сценарии эволюции ОДКБ.

Первый сценарий («инерция») характеризуется сохранением состава ОДКБ и дальнейшим снижением степени внешнеполитической координации. При этом варианте развития событий Армения сохраняет формальное членство в Организации, фактически заморозив участие в ее деятельности. Внешнеполитическая координация все более сводится к общим заявлениям о поддержке «неделимости безопасности» и «более справедливого мироустройства» и (как ни тавтологично это звучит) «укреплению координации» [26]. Организация продолжает движение по накатанной траектории, но движение по инерции, как известно, не может не замедляться.

Второй сценарий («возрастающая релевантность») характеризуется сохранением состава ОДКБ и повышением степени внешнеполитической координации. При этом сценарии угрозы территориальной целостности заставляют Армению постепенно вернуться к участию в деятельности ОДКБ. Нарастающий «экспорт нестабильности» из Афганистана подталкивает Россию и центральноазиатских союзников к выработке скоординированного подхода. Хрупкость внутривосточной ситуации в самих странах Центральной Азии заставляет руководство этих государств в большей степени учитывать интересы России при принятии внешнеполитических решений.

Третий сценарий («шагреновая кожа») определяется сужением состава ОДКБ при снижении степени внешнеполитической координации. Армения, заключив мирный договор с Азербайджаном, принимает решение о выходе из ОДКБ. Дискуссии о целесообразности сохранения членства в Организации активизируются в Казахстане, Таджикистан начинает рассматривать обеспечение своей безопасности сквозь призму сотрудничества с Ираном, КНР и, возможно,

³ ИГИЛ – организация, деятельность которой запрещена в России.

Индией. Российское руководство фактически списывает ОДКБ со счетов как не оправдавшую себя инвестицию.

Четвёртый сценарий («сплочение») характеризуется сокращением состава ОДКБ при повышении внешнеполитической координации в пределах сузившегося круга союзников. Потеря Армении оказывает незначительное воздействие на функционирование ОДКБ. Вывод за рамки деятельности Организации вызывавшего внутренние противоречия «армянского вопроса» способствует ее консолидации как альянса России и стран Центральной Азии. Центральноеазиатское направление становится ключевым в деятельности Организации, а нарастающие в Центральной Азии угрозы и вызовы ведут к наращиванию военного потенциала союза.

Авторы оценивают вероятность первого сценария в 70%, второго – в 5%, третьего – в 15%, четвертого – в 10%.

Заключение

Трудности, с которыми сталкивается ОДКБ, не предполагают простых механизмов урегулирования: СВО приобретает затяжной характер, силовая операция Азербайджана в Нагорном Карабахе 19–20 сентября 2023 г. вновь указала на отсутствие в ОДКБ консенсуса по вопросам обеспечения безопасности Армении и глубокое недовольство Еревана деятельностью Организации, по-прежнему сохраняются противоречия между Таджикистаном и Кыргызстаном. Серьезной внешней угрозой является афганская проблема, об остроте и многоаспектности которой напоминает реализуемый правительством талибов проект строительства канала Куш-Тепа, чреватый серьезными рисками для водного хозяйства Таджикистана, Узбекистана и Туркменистана.

Важно отметить обстоятельство, которое часто упускают из виду при оценке деятельности ОДКБ. Изначально Организация создавалась как инструмент

для разрешения локальных кризисов. Ее концепция не предполагает реагирования на кризисы, ставшие следствием распада европейской системы безопасности и основ глобального миропорядка. Несовпадение национальных интересов большинства стран ОДКБ по наиболее насущным вопросам безопасности на постсоветском пространстве – объективное обстоятельство, ограничивающее эффективность ОДКБ и снижающее ожидания от Организации.

В таких условиях проводимая ОДКБ линия по сохранению нейтралитета в отношении украинского кризиса, поиску минимальных точек соприкосновения в интересах стран-участниц и поступательное продвижение сотрудничества по традиционным направлениям являются оптимальной тактикой. В этом ряду принципиальной задачей для объединения должно стать урегулирование таджикско-киргизских противоречий и формирование стратегии в отношении Афганистана. Однако очевидной проблемой становится отсутствие долгосрочной стратегии развития организации. Активизация сотрудничества на данном направлении должна также стать основной задачей для российской политики в отношении ОДКБ.

Помимо внутренних факторов, на деятельность ОДКБ также влияет внешнеполитическая конъюнктура. Учитывая высокую степень ее неопределенности, в докладе представлены три сценария будущего ОДКБ. Второй из них – «Боевое братство» – предлагается рассматривать в качестве базового варианта. В дальнейшем он может трансформироваться в третий сценарий – «Новую архитектуру безопасности». Можно предположить, что в условиях нынешнего кризиса системы международных отношений ключевые региональные игроки придут к необходимости конструктивного обсуждения будущего евразийской безопасности. В данном процессе ОДКБ сможет принять участие и внести свой содержательный вклад как эффективная структура многостороннего взаимодействия, выдержавшая «идеальный шторм» первой половины 2020-х гг.

Список источников

1. Концепция внешней политики Российской Федерации. 15 июля 2008 г. URL: <http://kremlin.ru/acts/news/785>
2. Концепция внешней политики Российской Федерации. 31 марта 2023 г. URL: <https://www.mid.ru/ru/detail-material-page/1860586/>
3. Заявление Совета коллективной безопасности ОДКБ в связи с 30-летием Договора о коллективной безопасности и 20-летием Организации Договора о коллективной безопасности. 16.05.2022. URL: <https://odkb-csto.org/documents/statements/zayavlenie-soveta-kollektivnoy-bezopasnosti-organizatsii-dogovora-o-kollektivnoy-bezopasnosti-v-svyaz/#loaded>
4. Список документов, подписанных на сессии Совета коллективной безопасности ОДКБ. 23.11.2022. URL: <http://kremlin.ru/supplement/5868>
5. Первые штабные переговоры по подготовке совместных учений с коллективными силами в 2023 году 30.03.2023. URL: https://jscsto.org/news/10381/?sphrase_id=2539
6. Сидоров А.А. Два десятилетия в едином боевом строю // Министерство обороны Российской Федерации. 17.04.2023. URL: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/483206/>
7. Совместное заявление Российской Федерации и Китайской Народной Республики об углублении отношений всеобъемлющего партнерства и стратегического взаимодействия, вступающих в новую эпоху. 21.03.2023. URL: <http://www.kremlin.ru/supplement/5920>

8. Секретариат ОДКБ: выстраивается новый формат отношений ОДКБ с Китаем и ШОС. 31.03.2023. URL: <https://www.belta.by/politics/view/sekretariat-odkb-vystraivaetsja-novyj-format-otnoshenij-odkb-s-kitaem-i-shos-558444-2023/>
9. Лукашенко сообщил о предложении Украины заключить пакт о ненападении. 24.01.2023. URL: <https://www.forbes.ru/society/484110-lukashenko-soobsil-o-predlozenii-ukrainy-zaklucit-pakt-o-nenapadenii>
10. Токаев заявил о феномене с одним на двоих ядерным оружием. 24.05.2023. URL: <https://www.rbc.ru/politics/24/05/2023/646e37859a79476721ed0252>
11. Концепция национальной безопасности Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P223s0001>
12. Пашинян отказался подписывать декларацию по итогам саммита ОДКБ. 23.11.2022. URL: <https://www.rbc.ru/politics/23/11/2022/637e67d89a794715b6c15a44>
13. Пашинян допустил выход Армении из ОДКБ. 22.05.2023. URL: <https://www.rbc.ru/politics/22/05/2023/646b35829a7947738c92b60b>
14. Послание премьер-министра Никола Пашиняна о Независимости. 24.09.2023. URL: <https://www.primeminister.am/ru/statements-and-messages/item/2023/09/24/Nikol-Pashinyan-messages/>
15. Пашинян объяснил, почему Армения не выходит из ОДКБ. 26.10.2023. URL: <https://www.rbc.ru/rbcfree-news/65397eba9a79470c258b27a4>
16. МИД Казахстана отказался занимать позиции в конфликте России и Украины. 02.03.2022. URL: <https://www.interfax.ru/world/825643>
17. Сотрудничество между Организацией Объединенных Наций и Советом Европы. Резолюция, принятая Генеральной Ассамблеей 26 апреля 2023 года. URL: https://digitallibrary.un.org/record/4010475/files/A_RES_77_284-RU.pdf?ln=en
18. Касым-Жомарт Токаев поздравил Владимира Путина с 30-летием со дня установления дипломатических отношений между Казахстаном и Россией. 20.10.2022. URL: <https://akorda.kz/ru/kasym-zhomart-tokaev-pozdravil-vladimira-putina-s-30-letiem-sodnya-ustanovleniya-diplomaticheskikh-otnosheniy-mezhdu-kazahstanom-i-rossiey-2292811>
19. Сессия Совета коллективной безопасности ОДКБ. 10.01.2022. URL: <http://kremlin.ru/catalog/keywords/18/events/67568>
20. Касым-Жомарт Токаев принял участие в сессии Совета коллективной безопасности ОДКБ в расширенном составе. 23 ноября 2023 г. URL: <https://www.akorda.kz/ru/kasym-zhomart-tokaev-prinyal-uchastie-v-sessii-soveta-kollektivnoy-bezopasnosti-odkb-2310205>
21. Киргизия и Таджикистан громко ссорятся. 17.10.2022. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5619937>
22. Киргизия и Таджикистан согласовали более 90% государственной границы. URL: <https://www.rbc.ru/politics/13/12/2023/657985e89a79476469abe94a>
23. Джоробекова А.Э., Троцкий Е.Ф., Юн С.М., Тимошенко А.Г. Региональная безопасность в Центральной Азии в условиях возвращения талибов к власти: вызовы и угрозы, сценарии развития // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 4: История. Регионоведение. Международные отношения. 2023. Т. 28. № 3. С. 187–196. <https://doi.org/10.15688/jvolsu4.2023.3.17>
24. Заявление министров иностранных дел государств – членов Организации Договора о коллективной безопасности о положении в Афганистане. 20 июня 2023 г. URL: <https://odkb-csto.org/documents/statements/zayavlenie-ministrov-inostrannykh-del-gosudarstv-chlenov-organizatsii-dogovora-o-kollektivnoy-bezop1/#loaded>
25. Совет коллективной безопасности 16 сентября 2021 года в Душанбе обсудил проблемы международной и региональной безопасности и их влияние на безопасность государств – членов ОДКБ // ОДКБ. URL: <https://odkb-csto.org/session/2021/sovetskollektivnoy-bezopasnosti-16-sentyabrya-v-dushanbe-obsudil-problemy-mezhdunarodnoy-i-regionaln/#loaded>
26. Заявление министров иностранных дел государств – членов ОДКБ об общих подходах к обеспечению безопасности евразийского пространства. 22.11.2023. URL: https://odkb-csto.org/news/news_odkb/zayavlenie-ministrov-inostrannykh-del-gosudarstvchlenov-organizatsii-dogovora-o-kollektivnoy-bezopa/#loaded

References

1. *Koncepciya vneshnej politiki Rossijskoj Federacii*. 15 iyulya 2008 g. [The concept of foreign policy of the Russian Federation. July 15, 2008] [Online]. Available from: <http://kremlin.ru/acts/news/785>
2. *Koncepciya vneshnej politiki Rossijskoj Federacii*. 31 marta 2023 g. [The concept of foreign policy of the Russian Federation. March 31, 2023] [Online]. Available from: <https://www.mid.ru/ru/detail-material-page/1860586/>
3. *Zayavlenie Soveta kollektivnoj bezopasnosti ODKB v svyazi s 30-letiem Dogovora o kollektivnoj bezopasnosti i 20-letiem Organizacii Dogovora o kollektivnoj bezopasnosti* [Statement by the CSTO Collective Security Council in connection with the 30th anniversary of the Collective Security Treaty and the 20th anniversary of the Collective Security Treaty Organization]. 16.05.2022 [Online]. Available from: <https://odkb-csto.org/documents/statements/zayavlenie-soveta-kollektivnoy-bezopasnosti-organizatsii-dogovora-o-kollektivnoy-bezopasnosti-v-svya/#loaded>
4. *Spisok dokumentov, podpisannykh na sessii Soveta kollektivnoj bezopasnosti ODKB* [List of documents signed at the session of the CSTO Collective Security Council]. 23.11.2022. URL: <http://kremlin.ru/supplement/5868>
5. *Pervye shtabnye peregovory po podgotovke sovestnykh uchenij s kollektivnymi silami v 2023 godu* [First staff negotiations on the preparation of joint exercises with collective forces in 2023]. 30.03.2023 [Online]. Available from: https://jsesto.org/news/10381/?sphrase_id=2539
6. *Sidorov, A.A. Dva desyatiletija v edinom boevom stroju* [Sidorov A.A. Two decades in a single battle formation]. 17.04.2023 [Online]. Available from: <https://army.ric.mil.ru/Stati/item/483206/>
7. *Sovmestnoe zayavlenie Rossijskoj Federacii i Kitajskoj Narodnoj Respubliki ob uglublenii otnoshenij vseob"emlyushchego partnerstva i strategicheskogo vzaimodejstviya, vstupayushchikh v novuyu ehpokhu* [Joint statement of the Russian Federation and the People's Republic of China on deepening relations of comprehensive partnership and strategic interaction entering a new era]. 21.03.2023 [Online]. Available from: <http://www.kremlin.ru/supplement/5920>
8. *Sekretariat ODKB: vystraivaetsya novyj format otnoshenij ODKB s Kitaem i SHOS* [CSTO Secretariat: a new format of relations between the CSTO and China and the SCO is being built]. 31.03.2023 [Online]. Available from: <https://www.belta.by/politics/view/sekretariat-odkb-vystraivaetsja-novyj-format-otnoshenij-odkb-s-kitaem-i-shos-558444-2023/>

9. Lukashenko soobshchil o predlozhenii Ukrainy zaklyuchit' pakt o nenapadenii [Lukashenko announced Ukraine's proposal to conclude a non-aggression pact]. 24.01.2023 [Online]. Available from: <https://www.forbes.ru/society/484110-lukashenko-soobshil-o-predlozhenii-ukrainy-zaklyuchit-pakt-o-nenapadenii>
10. Tokayev zayavil o fenomene s odnim na dvoikh yadernym oruzhiem [Tokayev announced a phenomenon with one nuclear weapon for two]. 24.05.2023 [Online]. Available from: <https://www.rbc.ru/politics/24/05/2023/646e37859a79476721ed0252>
11. Koncepciya nacional'noj bezopasnosti Respubliki Belarus' [National Security Concept of the Republic of Belarus] [Online]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P223s0001>
12. Pashinyan otkazalsya podpisivat' deklaraciyu po itogam sammita ODKB [Pashinyan refused to sign a declaration following the CSTO summit]. 23.11.2022 [Online]. Available from: <https://www.rbc.ru/politics/23/11/2022/637e67d89a794715b6c15a44>
13. Pashinyan dopustil vykhod Armenii iz ODKB [Pashinyan allowed Armenia to leave the CSTO]. 22.05.2023 [Online]. Available from: <https://www.rbc.ru/politics/22/05/2023/646b35829a7947738c92b60b>
14. Poslanie prem'er-ministra Nikola Pashinyana o Nezavisimosti [Message from Prime Minister Nikol Pashinyan on Independence]. 24.09.2023 [Online]. Available from: <https://www.primeminister.am/ru/statements-and-messages/item/2023/09/24/Nikol-Pashinyan-messages/>
15. Pashinyan ob "yasnil, pochemu Armeniya ne vykhodit iz ODKB [Pashinyan explained why Armenia does not leave the CSTO]. 26.10.2023 [Online]. Available from: <https://www.rbc.ru/rbcfreenews/65397eba9a79470c258b27a4>
16. MID Kazakhstana otkazalsya zanimat' pozicii v konflikte Rossii i Ukrainy [he Kazakh Foreign Ministry refused to take a position in the conflict between Russia and Ukraine]. 02.03.2022 [Online]. Available from: <https://www.interfax.ru/world/825643>
17. Sotrudnichestvo mezhdru Organizaciej Ob"edinennykh Nacij i Sovetom Evropy. Rezolyuciya, prinyataya General'noj Assambleej 26 aprelya 2023 goda [Cooperation between the United Nations and the Council of Europe. Resolution adopted by the General Assembly on April 26, 2023] [Online]. Available from: https://digitalibrary.un.org/record/4010475/files/A_RES_77_284-RU.pdf?ln=en
18. Kasym-Zhomart Tokayev pozdravil Vladimira Putina s 30-letiem so dnya ustanovleniya diplomaticheskikh otnoshenij mezhdru Kazakhstanom i Rossiej [Kassym-Jomart Tokayev congratulated Vladimir Putin on the 30th anniversary of the establishment of diplomatic relations between Kazakhstan and Russia]. 20.10.2022 [Online]. Available from: <https://akorda.kz/ru/kasym-zhomart-tokayev-pozdravil-vladimira-putina-s-30-letiem-so-dnya-ustanovleniya-diplomaticheskikh-otnosheniy-mezhdru-kazahstanom-i-rossiej-2292811>
19. Sessiya Soveta kolektivnoj bezopasnosti ODKB [Session of the CSTO Collective Security Council]. 10.01.2022 [Online]. Available from: <http://kremlin.ru/catalog/keywords/18/events/67568>
20. Kasym-Zhomart Tokayev prinyal uchastie v sessii Soveta kolektivnoj bezopasnosti ODKB v rasshirennom sostave. 23 noyabrya 2023 g. [Kassym-Jomart Tokayev took part in the session of the CSTO Collective Security Council in an expanded format] [Online]. Available from: <https://www.akorda.kz/ru/kasym-zhomart-tokayev-prinyal-uchastie-v-sessii-soveta-kollektivnoy-bezopasnosti-odkb-2310205>
21. Kirgiziya i Tadzhiqistan gromko ssoryatsya [Kyrgyzstan and Tajikistan are quarreling loudly]. 17.10.2022 [Online]. Available from: <https://www.kommersant.ru/doc/5619937>
22. Kirgiziya i Tadzhiqistan soglasovali bolee 90% gosudarstvennoj granicy [Kyrgyzstan and Tajikistan have agreed on more than 90% of the state border] [Online]. Available from: <https://www.rbc.ru/politics/13/12/2023/657985e89a79476469abe94a>
23. Jorobekova, A.E., Troitsky, E.F., Yun, S.M., & Timoshenko, A.G. (2023) Regional'naya bezopasnost' v Central'noj Azii v usloviyakh vozvrashcheniya talibov k vlasti: vyzovy i ugrozy, scenarii razvitiya [Regional security in Central Asia in the context of the Taliban's return to power: challenges and threats, development scenarios]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4. Istoriya. Regionovedenie. Mezhdunarodnye otnosheniya – Volgograd State University Journal. History. Area Studies. International Relations*. 28 (3). pp. 187–196. doi: <https://doi.org/10.15688/jvolsu4.2023.3.17>
24. Zayavlenie ministrov inostrannykh del gosudarstv — chlenov Organizacii Dogovora o kolektivnoj bezopasnosti o polozhenii v Afganistane. 20 iyunya 2023 g. [Statement by the foreign ministers of the member states of the Collective Security Treaty Organization on the situation in Afghanistan. June 20, 2023] [Online]. Available from: <https://odkb-csto.org/documents/statements/zayavlenie-ministrov-inostrannykh-del-gosudarstv-chlenov-organizatsii-dogovora-o-kollektivnoy-bezop1/#loaded>
25. Sovet kolektivnoj bezopasnosti 16 sentyabrya 2021 goda v Dushanbe obsudil problemy mezhdunarodnoj i regional'noj bezopasnosti i ikh vliyanie na bezopasnost' gosudarstv — chlenov ODKB [The Collective Security Council on September 16, 2021 in Dushanbe discussed the problems of international and regional security and their impact on the security of the CSTO member states] [Online]. Available from: <https://odkb-csto.org/session/2021/sovet-kollektivnoy-bezopasnosti-16-sentyabrya-v-dushanbe-obsudil-problemy-mezhdunarodnoy-i-regionaln/#loaded>
26. Zayavlenie ministrov inostrannykh del gosudarstv-chlenov ODKB ob obshchikh podkhodakh k obespecheniyu bezopasnosti evrazijskogo prostranstva [Statement by the Ministers of Foreign Affairs of the CSTO member states on common approaches to ensuring the security of the Eurasian space]. 22.11.2023 [Online]. Available from: https://odkb-csto.org/news/news_odkb/zayavlenie-ministrov-inostrannykh-del-gosudarstv-chlenov-organizatsii-dogovora-o-kollektivnoy-bezopa/#loaded

Информация об авторах:

Троицкий Евгений Флорентьевич – доктор исторических наук, профессор кафедры мировой политики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: efroitskiy@yandex.ru. ORCID: 0000-0001-6489-7193.
Юн Сергей Миронович – кандидат исторических наук, заведующий кафедрой мировой политики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sergey.yun@mail.tsu.ru. ORCID: 0000-0001-6166-1716.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Troitsky Evgeny F., Dr.Sc. (History), Professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: efroitskiy@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6489-7193.

Yun Sergey M., Cand.Sc. (History), Head of the Department of World Politics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sergey.yun@mail.tsu.ru; ORCID: 0000-0001-6166-1716.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 07.04.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 07.04.2024; accepted for publication 30.10.2024

Научная статья
УДК 351.82
doi: 10.17223/29491665/6/8

Механизмы стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь

Анастасия Михайловна Погорельская¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный, Томск, Россия, pogorelskaya@mail.tsu.ru*

Аннотация. Ввиду международных санкций с 2022 г. Республика Беларусь вынуждена обеспечивать развитие национальной инновационной системы без поддержки многих прежних партнеров и возможности экспорта технологичной продукции на привычные рынки. Целью работы является оценка существующих инструментов стимулирования инновационной деятельности Республики Беларусь, их ограничений и перспектив в текущих международных условиях.

Ключевые слова: инновации, льготы, НИОКР, инновационная инфраструктура

Для цитирования: Погорельская А.М. Механизмы стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 6. С. 70–79. doi: 10.17223/29491665/6/8

Original article
doi: 10.17223/29491665/6/8

Mechanisms for promotion of innovative activities in the Republic of Belarus

Anastasia M. Pogorelskaya¹

¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, pogorelskaya@mail.tsu.ru*

Abstract. The research purpose is to determine the features, limitations and prospects of mechanisms for stimulating innovation activity in the Republic of Belarus. The research methods were the analysis of statistical data and strategic documents related to the national innovation system of the Republic of Belarus. The sources of information for this study were reports from relevant departments of the Republic of Belarus related to the implementation, control and evaluation of the development of science and innovation, as well as data from national statistical departments and international organizations – the World Intellectual Property Organization and the UN Economic Commission for Europe.

Firstly, the characteristics of Belarusian national innovation system are provided including its positions in international environment. Then the mechanisms of promoting innovation activity are considered in detail. Finally, the results, limitations and prospects of Belarusian policy of encouraging innovations are summarized regarding current international situation.

The following conclusions were made. The state plays a major role in stimulating innovation activity in the Republic of Belarus. The country has created a centralized system for the development and financing of R&D and innovation activities. To stimulate innovation activity in the Republic of Belarus, a number of mechanisms are used, including strategic planning, creation of innovation infrastructure, economic measures, R&D project funding and international research and innovation cooperation.

The country's strength is the impressive system of state planning for research, technical and innovative development. Centralization of power makes it possible to concentrate resources on priority areas and industries for the state. Considering the size of the country, it has a fairly broad innovation infrastructure.

However, the factors limiting the innovative development of the Republic of Belarus today include the low resource availability for research activities, including low state expenditures on R&D and the lack of enterprises' own funds for innovation; high economic risks of innovation activity, which worsened due to the international crisis of 2022–2023; as well as the curtailment of previously promising areas of international innovation cooperation. Thus, recent events indicate that the Republic of Belarus plans to rely on the development of research, technical and innovative cooperation with the CIS countries and Russia in the first place.

Keywords: innovations, benefits, research & development, innovation infrastructure

For citation: Pogorelskaya, A.M. (2024) Mechanisms for promotion of innovative activities in the Republic of Belarus. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 6. pp. 70–79. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/6/8

Введение

Взаимодействие России и Белоруссии с 1990-х гг. носит комплексный характер и распространяется, пожалуй, на все сферы сотрудничества. Вдобавок это взаимодействие строится на широкой правовой базе, включающей акты Союзного государства, Таможенного союза, а затем и Евразийского экономического союза. Между странами заключено более 250 межгосударственных и межправительственных договоров и соглашений. Одним из последних стало межправительственное соглашение о научно-техническом и инновационном сотрудничестве, подписанное в марте 2023 г., предусматривающее совместную научно-исследовательскую работу по вопросам создания новых материалов и способов их обработки, генетических исследований, исследований в области нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных технологий, а также совместное создание и использование необходимой для этого инфраструктуры [1]. Его подписание свидетельствует об активизации сотрудничества двух стран в сфере инноваций, что обусловлено сходством стоящих перед странами задач в текущей международной обстановке.

В сложной ситуации, в которой оба государства оказались после 24 февраля 2022 г., обусловленной введением масштабных санкций, Россия и Белоруссия потеряли возможности импорта многих технологий и высокотехнологичной продукции из государств, бывших некогда их ключевыми экономическими партнерами. Стало сворачиваться официальное научно-техническое и инновационное сотрудничество со странами, которые ввели санкции. На этом фоне сократились и возможности привлечения иностранных инвестиций, технологий и кадров в высокотехнологичные проекты. В этой связи актуализировались задачи поддержания и развития Республикой Беларусь и Россией собственных инновационных систем и налаживания их взаимодействия. Актуальность исследования механизмов стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь сегодня обусловлена необходимостью оценки их ограничений и перспектив в текущей ситуации.

Цель исследования – определить особенности, ограничения и перспективы механизмов стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь.

Источниками информации для данного исследования послужили отчеты профильных ведомств Республики Беларусь, связанные с реализацией, контролем и оценкой развития науки и инновационной деятельности в стране, а также данные национальных статистических ведомств и международных организаций – Всемирной организации интеллектуальной

собственности, Европейской экономической комиссии ООН.

Белорусские исследователи относительно часто обращаются к тематике развития инновационной деятельности на родине. Однако они признают, что инновационное развитие в Республике Беларусь пока идет экстенсивным, а не интенсивным путем, как, впрочем, и в России [2]. Согласно исследованию Е.М. Карпенко и Д.А. Павловой, наибольшую значимость для инновационного развития страны имеют значения таких показателей, как длительность среднего образования, уровень инфляции, количество исследователей, количество заявок на патенты, темпы прироста высокотехнологичного экспорта, уровень безработицы, ключевая ставка процента, приток прямых иностранных инвестиций и государственные расходы на образование [3]. Однако в силу ограниченности ресурсов, доступных стране для стимулирования инновационной деятельности, исследователями даются рекомендации по налаживанию согласованности между научными, научно-техническими разработками и инновационной деятельностью, совершенствованию прогнозирования в этой сфере [4], развитию интеллектуальных ресурсов страны [5], стимулированию государственно-частного партнерства [6], содействию созданию инновационно-промышленных кластеров [7] как способам развития инновационной системы Республики Беларусь.

Характеристика национальной инновационной системы Республики Беларусь

Формально, по определению Государственного комитета по науке и технологиям, национальная инновационная система Республики Беларусь представляет собой «совокупность государственных органов, иных государственных организаций, регулирующих в пределах своей компетенции отношения в сфере инновационной деятельности, юридических и физических лиц, в том числе индивидуальных предпринимателей, осуществляющих и (или) обеспечивающих инновационную деятельность» [8]. В этой связи компонентами национальной инновационной системы Республики Беларусь признаются республиканские и местные органы государственного управления, Национальная академия наук, учреждения образования, юридические и физические лица, участвующие в инновационной деятельности, а также субъекты национальной инновационной деятельности и инфраструктуры. К последним причисляются, в частности, научно-технологические парки и центры трансфера технологий.

По данным на 2022 г. в Республике Беларусь 521 организация осуществляла затраты на инновации, при

этом доля таких организаций в стране росла на протяжении последних лет (рис. 1) [9].



Рис. 1. Доля организаций, инвестировавших в инновации или отгрузивших инновационную продукцию, 2015–2022 гг.

Fig. 1. Share of organizations that invested in innovations or produced innovative commodities, 2015–2022

Доля инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции предприятиями промышленности на протяжении последних лет колебалась в пределах 13–20% (рис. 2) [9].



Рис. 2. Доля инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции, 2015–2022 гг.

Fig. 2. Share of innovative goods in general volume of shipped commodities, 2015–2022

Научно-исследовательскими разработками, по данным на 2022 г., в стране занимались 448 организаций и 25,2 тыс. человек. Большинство из последних составляли исследователи – 65,1%. Из них пятая часть имела научную степень: 523 человека со степенью доктора наук, 2 564 человека – со степенью кандидата наук. На втором месте по численности среди работников научно-исследовательских организаций был представлен вспомогательный персонал (27,3%), на третьем – техники (7,6%) [10]. Престижность работы в сфере НИОКР, однако, остается не высока, в том числе и ввиду небольших даже по белорусским меркам зарплат.

Законом Республики Беларусь «О государственной инновационной политике и инновационной дея-

тельности» от 10 июля 2012 г. № 425-3 целью государственной инновационной политики было объявлено «создание благоприятных социально-экономических, организационных и правовых условий для инновационного развития и повышения конкурентоспособности национальной экономики» [11]. На этом фоне страна с 2012 г. была включена в оценку инновационного потенциала в рамках Индекса инновационного развития, составляемого Всемирной организацией интеллектуальной собственности (WIPO). Индекс основан на рейтинговой системе, поэтому чем ближе позиция страны к началу списка, тем выше оценивается её инновационный потенциал (рис. 3) [12].



Рис. 3. Позиции Республики Беларусь в Глобальном инновационном индексе, 2012–2023 гг.

Fig. 3. Positions of Belarus in Global Innovation Index, 2012–2023

Как видно из рис. 3, с 2018 по 2021 г. включительно позиции Республики Беларусь в Глобальном индексе инноваций улучшались, однако с 2022 г. её показатели резко ухудшились. В результате последний рейтинг 2023 г. понизил её до 80-й позиции, оценив гораздо хуже, чем двумя годами ранее, эффективность работы институтов в стране, состояние инфраструктуры, а также уровень влияния инноваций на знания и, в частности, на рост производительности труда [12]. Учитывая, что развитие институтов и инфраструктуры – это долгосрочные процессы, которые сложно одновременно повернуть вспять, можно усмотреть в подобных изменениях оценок отчасти и политический подтекст.

Механизмы стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь

В стимулировании инновационной деятельности в Республике Беларусь большую роль играет государство, чья роль мало изменилась с советского времени во многих аспектах жизни белорусского общества. Белорусская наука и инновации не столько поддерживаются, сколько тщательно контролируются госу-

дарством. В стране создана централизованная система развития и финансирования НИОКР и инновационной деятельности. Основными источниками финансирования научной, научно-технической и инновационной деятельности являются средства республиканского бюджета и инновационных фондов. Контроль за использованием бюджетных средств осуществляет Государственный комитет по науке и технологиям.

Действие рыночных механизмов на стимулирование инновационной деятельности очень ограничено. В результате в ведение государства попадают все этапы инновационного развития от проведения научных исследований (НИОКР) до их внедрения в производство и стимулирование потребления инновационной продукции, в том числе мотивирование предприятий к её экспорту за рубеж.

В рамках стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь используется ряд механизмов, которые включают стратегическое планирование, создание инновационной инфраструктуры, меры экономического характера, целевое финансирование научных разработок, развитие международного научно-технического и инновационного сотрудничества. Ниже каждый из этих механизмов будет рассмотрен подробнее.

Стратегическое планирование. Стимулирование инновационного развития в Республике Беларусь опирается на значительный объем стратегических документов, которые регулярно принимаются на самом высоком уровне, определяя приоритеты государства в данной сфере.

Так, Указом Президента Республики Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г. были утверждены приоритетные направления научной, научно-технической и инновационной деятельности в Беларуси на 2021–2025 гг. В качестве таковых были указаны цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные, биологические, медицинские, фармацевтические, химические технологии, технологии безопасности, а также технологии в сфере энергетики и экологии, машиностроения, агропромышленности [13].

Указом Президента Республики Беларусь № 348 от 15 сентября 2021 г. была утверждена Государственная программа инновационного развития Беларуси на 2021–2025 гг. Согласно ей, приоритетной задачей государственной инновационной политики названо повышение эффективности национальной инновационной системы до уровня стран Восточной Европы. В качестве целевых показателей в Программе предлагается рассматривать увеличение таких относительных показателей, как удельный вес инновационно активных предприятий – до 30,5% к

2025 г.; долю организаций с процессными инновациями – до 35%; удельный вес отгруженной инновационной продукции – до 21%; долю отгруженной новой или значительно улучшенной инновационной продукции обрабатывающей промышленности – до 54%; долю экспорта наукоемкой и высокотехнологичной продукции – до 35,6%. Из абсолютных показателей фигурировало только количество созданных (модернизированных) рабочих мест в рамках инновационной деятельности. Их планировалось увеличить с 1 437 (2021 г.) до 3 324 (2025 г.) [14]. Всего же в рамках программы должно быть реализовано 75 инновационных проектов по созданию высокотехнологичных производств.

Отдельно в 2021 г. была принята Государственная программа по цифровому развитию страны на период 2021–2025 гг., предусматривающая создание и развитие современной информационно-коммуникационной инфраструктуры, внедрение цифровых инноваций и обеспечение информационной безопасности реализуемых решений. Во многом она продолжила заявленные в предыдущей программе на 2016–2020 гг. инициативы. Множество целевых показателей, на выполнение которых направлена текущая программа, связаны с обеспечением населения доступом в интернет и к электронным государственным услугам, в частности, повышением уровня цифровой грамотности и степени цифрового взаимодействия между предприятиями и государственными органами. Предполагается, что её выполнение позволит внедрить ИКТ и передовые производственные технологии в национальную экономику и остальные сферы жизни [15].

Стратегические документы в области развития науки также связаны, в первую очередь, с развитием инновационных технологий. В частности, Стратегия «Наука и технологии: 2018–2040» в качестве приоритетов прорывного характера поставила развитие технологий цифрового производства (включая искусственный интеллект и суперкомпьютеры), промышленные технологии (включая разработку «умных» материалов, аддитивных, нано- и биотехнологических приложений, робототехники и беспилотников), а также социогуманитарные технологии. В основу стратегии заложена модель «Беларусь интеллектуальная», предполагающая внедрение цифровых технологий, развитие неиндустриального комплекса – производств на основе нано-, био-, IT- и аддитивных технологий с применением композиционных материалов, а также содействие становлению высокоинтеллектуального общества [16].

В текущий период также действует Государственная программа «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 гг., которая предполагает стимулирова-

ние развития инновационных биотехнологий, технологий в области ядерной энергетики, создания инновационных продуктов на основе минерального и органического сырья, внедрения экологически безопасных химических и молекулярных технологий, а также исследования космического пространства [17].

Создание инновационной инфраструктуры. Согласно ст. 25 Закона «О государственной инновационной политике и инновационной деятельности в Республике Беларусь», к субъектам инновационной инфраструктуры относятся технопарки, центры трансфера технологий, венчурные организации, а также иные юридические лица в случаях, предусмотренных законодательными актами [11].

Общее количество субъектов инновационной инфраструктуры выросло в стране. На данный момент к инновационной инфраструктуре в Республике Беларусь относят 24 субъекта, включая 16 технопарков, 6 центров трансфера технологий, Белорусский инновационный фонд и Национальный центр интеллектуальной собственности.

Задачами технопарков являются предоставление технической и консультационной помощи на высокотехнологичном производстве, содействие коммерциализации разработок, реализации инновационных проектов и экспорту высокотехнологичной продукции. Для резидентов технопарков действует ряд льгот (см. табл. 1).

Центры трансфера технологий призваны предоставлять инжиниринговые и консультационные услуги, в том числе проводить исследования рынка под заказ и искать инвесторов. Для резидентов центров трансфера технологий действует ряд льгот (см. табл. 2).

Экономические меры. К ним, в первую очередь, относятся предоставление налоговых льгот субъектам инновационной деятельности, реализующим НИОКР и/или производящим инновационную продукцию, включая освобождение от отдельных налогов или применение пониженных налоговых ставок. Кроме того, к мерам экономического характера относятся преференции в области таможенного регулирования. Эти меры комплексно распространяются на резидентов технопарков (табл. 1) и центров трансфера технологий (табл. 2).

Таблица 1

Льготы для резидентов технопарков [18]

Наименование льготы	Действие льготы
Снижение налога на прибыль	10% (вместо 20%) или 5% + 5% при формировании в технопарке собственного фонда инновационного развития, получающего половину на поддержку резидентов
Освобождение от местных налогов и сборов	0% налог на прибыль организаций за исключением тех, имущество или от 50% уставного фонда которых принадлежат Республике Беларусь, 0% земельный налог, 0% налог на недвижимость, 0% налог по упрощенной системе налогообложения
Снижение таможенных пошлин на импорт технологического оборудования, комплектующих для реализации инновационных проектов	0% при условии участия резидента в проектах Государственной программы инновационного развития, для целей которой предпринимается импорт
Снижение стоимости аренды помещений	Понижающий коэффициент (0,1–0,9) к базовой арендной ставке для резидентов

Таблица 2

Льготы для резидентов центров трансфера технологий [19]

Наименование льготы	Действие льготы
Снижение налога на прибыль	10% (вместо 20%)
Освобождение от местных налогов и сборов	0% земельный налог, 0% налог на недвижимость
Снижение таможенных пошлин на импорт технологического оборудования, комплектующих для реализации инновационных проектов	0% при условии участия резидента в проектах Государственной программы инновационного развития, для целей которой предпринимается импорт

С 2005 г. в стране также действует Парк высоких технологий, призванный обеспечивать благоприятные условия для создания в стране программного обеспечения и ИКТ. При условии, что резиденты парка работают в высокотехнологичном бизнесе, они могут рассчитывать на ряд льгот (табл. 3).

Кроме того, в Республике Беларусь с 2011 г. действует Китайско-Белорусский индустриальный парк

«Великий камень», резидентами которого могут выступать компании вне зависимости от страны происхождения капитала. Основным требованием к потенциальному резиденту служит минимальный объем инвестиций, которые он готов сделать. В частности, он должен составлять не менее 5 млн долл. США, при реализации инвестиционного проекта в сфере НИОКР – не менее 500 тыс. долл. США на три года.

В случае же участия в крупном инвестиционном проекте объем инвестиций от потенциального резидента должен составить не менее 50 млн долл. США в течение 5 лет [21]. Взамен резиденты получают ряд льгот (табл. 4).

Целевое финансирование научных разработок: Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, учрежденный в 1991 г., финанси-

рует фундаментальные научные исследования, отобранные на основе открытых конкурсов. За период 1991–2022 гг. фонд профинансировал чуть менее 10 тыс. проектов, включая 2,6 тыс. проектов молодых ученых [22]. Бюджет фонда формируется за счет средств республиканского бюджета, добровольных взносов организаций, общественных объединений и граждан, а также заказчиков исследований.

Таблица 3

Льготы для резидентов Парка высоких технологий [20]

Наименование льготы	Действие льготы
Сниженный налог на добавленную стоимость	0%
Сниженный налог на прибыль	0%
Сниженные таможенные пошлины	0% (при ввозе технологического оборудования)
Сниженный налог на доходы иностранных организаций	5% для организаций, не осуществляющих деятельность в Республике Беларусь через постоянное представительство
НДС и налог на прибыль	0% (на майнинг, покупку/продажу и обмен криптовалют, другие операции с токенами)
Сниженный налог на недвижимость	0% (в отношении объектов, расположенных на территории ПВТ (за исключением сдаваемых резидентами ПВТ в аренду)
Сниженный земельный налог	0% (в отношении земельных участков в границах ПВТ на период строительства на них резидентами, но не более чем на 3 года, капитальных строений (зданий, сооружений), предназначенных для осуществления деятельности резидентов ПВТ)
Сниженный подоходный налог	9% (в 2023–2024 годах применяется обычная ставка 13%)
Взносы в Фонд социальной защиты населения по доходам работников	Уплачиваются исходя из средней заработной платы по Беларуси
Налог на доходы иностранных организаций	5% (не осуществляющих деятельность в Республике Беларусь через постоянное представительство, при выплате иностранной организацией дивидендов от резидента ПВТ)

Таблица 4

Льготы для резидентов индустриального парка [21]

Наименование льготы	Действие льготы
Налоговые льготы по заработной плате	35% отчисления в Фонд социальной защиты населения от средней заработной платы по стране (в стране в целом принято 35%, включая взносы на пенсионное страхование – 29% и взносы на социальное страхование – 6%, однако заработная плата в парке выше), 0% налог с иностранных работников
Снижение подоходного налога	9% (по стране 13%)
Снижение налога на добавленную стоимость	0%
Таможенные пошлины	0% на оборудование и комплектующие, а также на сырье и материалы при экспорте товаров за пределы ЕАЭС (таможенная процедура свободной таможенной зоны)
Сниженные корпоративные налоги	0% (до 2062 г.) – налоги на землю и недвижимость; 0% (в течение 5 лет или 10 лет для крупных инвестиционных проектов) – налог на дивиденды; 0% (в течение 10 лет) – налог на прибыль и последующая его уплата по ставке, сниженной в 2 раза, до 2062 г.

Наконец, для целей стимулирования инновационной деятельности в стране работают Белорусский инновационный фонд (Белинфонд), образованный в 1998 г. для осуществления финансовой поддержки НИОКР и венчурных проектов как на условиях возвратного финансирования, так и в виде невозвратных инновационных ваучеров до 25 тыс. долл. или грантов до 100 тыс. долл. [23] Средства фонда формируются из республиканского бюджета.

Развитие международного научно-технического и инновационного сотрудничества: Данное направление взаимодействия развивалось как в рамках всевозможных международных научных организаций и ассоциаций, так и на основе двусторонних соглашений о сотрудничестве между Национальной академией наук и аналогичными структурами в других странах. Белорусские ученые вплоть до 2022 г. активно участвовали в Рамочных программах ЕС по

науке и инновациям, инициативе Европейской комиссии «Графен» с бюджетом 1 млрд евро и других проектах (MESMERISE, STIMEY, EU-STRAT, SUPERTWIN и т.д.) Однако с введением санкций официальное привлечение к ним белорусских исследовательских организаций и их сотрудников было свернуто. Наряду с европейским направлением с 2000 г. реализовано 57 программ по разработке новых технологий и созданию инновационной продукции в рамках Союзного государства России и Беларуси. В 2020 г. была утверждена Межгосударственная программа инновационного сотрудничества на базе СНГ до 2030 г., предполагающая развитие необходимой инфраструктуры, подготовку кадров, содействие промышленной кооперации, проведение экспертизы технологических запросов и технологий для обеспечения коммерциализации последних [24].

Результаты и ограничения текущей политики

Сильной стороной белорусской политики по стимулированию инновационного развития является система её подробного планирования со стороны госу-

дарства. Ставшая традиционной централизация власти в стране позволяет сконцентрировать ресурсы на приоритетных для государства сферах и отраслях. Наличие относительно широкой инновационной инфраструктуры позволяет оказывать поддержку потенциальным инвесторам, однако их перечень все равно остается довольно ограниченным.

Несмотря на наличие довольно широкого спектра инструментов стимулирования инновационной деятельности в Республике Беларусь и даже сопоставимых с соседними странами относительных затрат на НИОКР (табл. 5) [25], для многих белорусских предприятий значимыми факторами, препятствующими инновационной деятельности, пока остаются нехватка собственных средств при высокой стоимости нововведений, высокие экономические риски и длительные сроки окупаемости вложений [26].

В соответствии с Национальной стратегией до 2030 г. для устойчивого социально-экономического развития страны требовалось повысить уровень затрат на научные исследования и разработки до 2,5% ВВП к 2020 г. и до 3% к 2030 г. [27], но стране пока далеко до этого значения.

Таблица 5

Затраты на НИОКР в % ВВП в отдельных странах Европы и СНГ, 2013–2021 гг.

Страна	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Азербайджан	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Армения	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Республика Беларусь	0,7	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
Грузия	0,1	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Казахстан	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Кыргызстан	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	...
Литва	0,9	1,0	1,0	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	...
Польша	0,9	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	1,3	1,4	...
Россия	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	...
Украина	0,7	0,7	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	0,3
Эстония	1,7	1,4	1,5	1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	1,7

Тем не менее отчеты ответственных ведомств указывают на то, что белорусской инновационной системе удастся не только удерживать поставленные до международного кризиса показатели, но и их улучшать. Так, по сведениям ГКНТ, доля экспорта наукоемкой и высокотехнологичной продукции за первые 9 месяцев 2023 г. составила 40,1% (на 2,6% выше, чем за аналогичный период годом ранее), а удельный вес инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции организаций обрабатывающей промышленности за январь–сентябрь 2023 г. составил 22,1% (на 1,7% выше показателя за 2022 г.). По официальным сообщениям, перевыполняются планы по созданию / модернизации рабочих мест субъектами инновационной инфраструктуры и по объемам выпуска продукции резидентами технопарков [28].

Пока остается проблематичной масштабная технологическая модернизация страны, поскольку абсолютные затраты Республики Беларусь на инновации не велики, а в сложных международных условиях они вряд ли смогут значительно увеличиться. Сохраняют свое влияние такие неблагоприятные факторы, как низкая обеспеченность ресурсами белорусской науки, ограниченность круга совместных предприятий и партнерств с международным участием в высокотехнологичных сферах. К ним добавилось сворачивание научно-технических и инновационных проектов с международными партнерами с 2022 г.

В этой связи кооперация с Россией на базе Союзного государства, а также по возможности иных форматов сотрудничества в регионе представляется

наиболее логичным направлением развития белорусской инновационной системы. В данном контексте показательно утверждение в конце января 2024 г. Стратегии научно-технологического развития Союзного государства до 2035 года, план мероприятий по которой сейчас находится в разработке.

Список источников

1. Соглашение между Правительством Российской Федерации и Правительством Республики Беларусь о научно-техническом и инновационном сотрудничестве от 27 марта 2023 года. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202309140001?index=3> (дата обращения: 31.01.2024).
2. Klimuk V., Nikishova A. Innovation of the Economic System: Belarusian Aspect. Analysis of innovative potential of Belarus and Russia // Eastern Academic Journal. 2018. № 4. P. 28–38.
3. Karpenka E.M., Pavlova D.A. Research of factors of growth of innovation activity in the Republic of Belarus // Proceedings of BSTU. 2022. No. 5. Economics and Management, № 1 (256). P. 53–59 (In English).
4. Zianchuk M., Saltanova I. Foresighting Technological and Innovative Development of Belarus // MEST Journal. 2020. Vol. 8. № 2. P. 192–199. doi: 10.12709/mest.08.08.02.22
5. Golovchanskaya E.E., Strelchenya E.I., Popkova E.G., Leonenko O.V. The key role of intellectual resources in the economic growth models in the institutional environment of innovative activity of the Republic of Belarus: theory and practice // Trade and Global Markets. 2018. Vol. 11, № 3. P. 213–227. doi: 10.1504/IJTG.M.2018.095813
6. Dorina E., Meshcheryakova O., Boris O., Momotova O., Vorontsova G. Public-Private Partnership as a Mechanism to Stimulate Innovation in Belarus Republic // The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences. 2019. Vol. 77. P. 245–252. doi: 10.15405/epsbs.2019.12.05.29
7. Преснякова Е.В. Формирование инновационно-промышленных кластеров на основе взаимодействия научных, образовательных и промышленных организаций // Экономика. Бизнес. Финансы. 2021. № 1. С. 8–14.
8. Национальная инновационная система // Государственный комитет по науке и технологиям, 2024. URL: https://gknt.gov.by/deyatelnost/innovatsionnaya-politika/natsionalnaya_innovatsionnaya_sistema/ (дата обращения: 31.01.2024).
9. Индикаторы, характеризующие инновационную деятельность в Республике Беларусь // Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2022. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/nauka-i-innovatsii/innovatsii/godovye-dannye/> (дата обращения: 31.01.2024).
10. Кадры науки в 2022 году // Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2022. URL: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/nauka-i-innovatsii/nauka/godovye-dannye/kadry-nauki/> (дата обращения: 31.01.2024).
11. Закон Республики Беларусь «О государственной инновационной политике и инновационной деятельности в Республике Беларусь» от 10 июля 2012 г. № 425-3. URL: https://kodeksy-bel.com/zakon_rb_o_gosudarstvennoj_innovatsionnoj_politike_i_innovatsionnoj_deyatelnosti.htm (дата обращения: 31.01.2024).
12. Global Innovation Index // World Intellectual Property Organization, 2024. URL: https://www.wipo.int/global_innovation_index/en/ (дата обращения: 31.01.2024).
13. Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» // Национальный центр правовой информации Республики Беларусь, 2020. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32000156&p1=1&p5=0> (дата обращения: 31.01.2024).
14. Указ Президента Республики Беларусь от 15 сентября 2021 г. № 348 «О Государственной программе инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 годы» // Официальный сайт Президента Республики Беларусь, 2021. URL: <https://president.gov.by/bucket/assets/uploads/documents/2021/348uk.pdf> (дата обращения: 31.01.2024).
15. Постановление Совета министров Республики Беларусь от 2 февраля 2021 г. № 66 «О Государственной программе “Цифровое развитие Беларуси на 2021–2025 гг.”» // Министерство связи и информатизации Республики Беларусь, 2021. URL: <https://www.mpt.gov.by/ru/bannerpage-gosprogramma-cifrovoye-razvitiye-belarusi-na-2021-2025> (дата обращения: 31.01.2024).
16. Стратегия «Наука и технологии: 2018–2040» // НАН Беларуси, 2018. URL: https://nasb.gov.by/congress2/strategy_2018-2040.pdf (дата обращения: 31.01.2024).
17. Постановление Совета министров Республики Беларусь от 23 апреля 2021 г. № 245 «О Государственной программе “Наукоёмкие технологии и техника” на 2021–2025 годы». URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100245> (дата обращения: 31.01.2024).
18. Технопарки Республики Беларусь 2023 // Государственный комитет по науке и технологиям. URL: <https://www.gknt.gov.by/upload/pdf/2023/tekhnparki-2023.pdf> (дата обращения: 31.01.2024).
19. Инновационная инфраструктура // БелИСА, 05.01.2024. URL: http://belisa.org.by/ru/nis/innovac_infrastr/ (дата обращения: 31.01.2024).
20. Преимущества и льготы // Парк высоких технологий, 2024. URL: <https://www.park.by/membership/advantages/> (дата обращения: 31.01.2024).
21. Регистрация резидентов // Индустриальный парк «Великий камень», 2024. URL: <https://industrialpark.by/investoram/registratsiya-rezidentov/> (дата обращения: 31.01.2024).
22. О Фонде // Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований, 2024. URL: https://www.fond.bas-net.by/obsved_.html (дата обращения: 31.01.2024).
23. О нас // Белорусский инновационный фонд, 2024. URL: <https://belinfund.by/> (дата обращения: 31.01.2024).
24. Межгосударственная программа инновационного сотрудничества государств-участников СНГ на период до 2030 года // Интернет-портал СНГ, 2020. URL: <https://e-cis.info/cooperation/3827/> (дата обращения: 31.01.2024).
25. Затраты на исследования и разработки в процентах от ВВП, % // Европейская экономическая комиссия ООН, 2022. URL: <https://w3.unece.org/SDG/ru/Indicator?id=123> (дата обращения: 31.01.2024).

26. О научной и инновационной деятельности в Республике Беларусь в 2022 году // Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2022. URL: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_bulletin/index_71088/ (дата обращения: 31.01.2024).
27. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года // Министерство экономики Республики Беларусь, 2017. URL: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (дата обращения: 31.01.2024).
28. ГКНТ: в Беларуси обеспечено функционирование 25 субъектов инновационной инфраструктуры // Belta.by, 24.11.2023. URL: <https://www.belta.by/society/view/gknt-v-belarusi-obespecheno-funktsionirovanie-25-subjektov-innovatsionnoj-infrastruktury-601722-2023/> (дата обращения: 31.01.2024).

References

1. *Agreement between the Government of the Russian Federation and the Government of the Republic of Belarus on research, technical and innovative cooperation* [Online]. Available from: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202309140001?index=3> (Accessed: 31.01.2024).
2. Klimuk, V. & Nikishova, A. (2018) Innovation of the Economic System: Belarusian Aspect. Analysis of innovative potential of Belarus and Russia. *Eastern Academic Journal*. 4. pp. 28–38.
3. Karpenka, E.M. & Pavlova, D.A. (2022) Research of factors of growth of innovation activity in the Republic of Belarus. *Proceedings of BSTU*. 1 (256). pp. 53–59.
4. Zianchuk, M. & Saltanova, I. (2020) Foresighting Technological and Innovative Development of Belarus. *MEST Journal*. 8 (2). pp. 192–199. doi: 10.12709/mest.08.08.02.22
5. Golovchanskaya, E.E., Strelchenya, E.I., Popkova, E.G. & Leonenko, O.V. (2018) The key role of intellectual resources in the economic growth models in the institutional environment of innovative activity of the Republic of Belarus: theory and practice. *Trade and Global Markets*. 11 (3). pp. 213–227. doi: 10.1504/IJTM.2018.095813
6. Dorina, E., Meshcheryakova, O., Boris, O., Momotova, O. & Vorontsova, G. (2019) Public-Private Partnership as a Mechanism to Stimulate Innovation in Belarus Republic. *The European Proceedings of Social and Behavioural Sciences*. 77. pp. 245–252. doi: 10.15405/epsbs.2019.12.05.29
7. Prasnjakova, A. (2021) Formirovanie innovacionno-promyshlennykh klasterov na osnove vzaimodejstvija nauchnyh, obrazovatel'nyh i promyshlennykh organizacij [Creation of innovative industrial clusters based on interactions among research, educational and industrial organizations]. *Economy. Business. Finances*. 1. pp. 8–14 (In Russian).
8. State Committee on Science and Technology (2024) *National Innovation System* [Online]. Available from: https://gknt.gov.by/deyatelnost/innovatsionnaya-politika/natsionalnaya_innovatsionnaya_sistema/ (Accessed: 31.01.2024).
9. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2022) *Indicators of innovation activities in the Republic of Belarus* [Online]. Available from: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/nauka-i-innovatsii/innovatsii/godovye-dannye/> (Accessed: 31.01.2024).
10. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2022) *Research staff in 2022* [Online]. Available from: <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-sector-ekonomiki/nauka-i-innovatsii/nauka/godovye-dannye/kadry-nauki/> (Accessed: 31.01.2024).
11. *The Law of the Republic of Belarus «On state innovation policy and innovative activity in the Republic of Belarus» adopted on 10 July 2012 № 425-3* [Online]. Available from: https://kodeksy-bel.com/zakon_rb_o_gosudarstvennoj_innovatsionnoj_politike_i_innovatsionnoj_deyatelnosti.htm (Accessed: 31.01.2024).
12. World Intellectual Property Organization (2024) *Global Innovation Index* [Online]. Available from: https://www.wipo.int/global_innovation_index/en/ (Accessed: 31.01.2024).
13. Pravo.by (2020) *The Decree of the President of the Republic of Belarus adopted on 7 May 2020 № 156 «On priority directions of research, technical and innovative activities in 2021–2025»* [Online]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=P32000156&p1=1&p5=0> (Accessed: 31.01.2024).
14. President of the Republic of Belarus (2021) *The Decree adopted on 15 September 2021 № 348 «On State programme of innovation development of the Republic of Belarus in 2021–2025»* [Online]. Available from: <https://president.gov.by/bucket/assets/uploads/documents/2021/348uk.pdf> (Accessed: 31.01.2024).
15. Ministry of Communications and Information of the Republic of Belarus (2021) *Resolution of the Council of the Ministers adopted on 2 February 2021 № 66 «On State programme «Digital development of Belarus» in 2021–2025»* [Online]. Available from: <https://www.mpt.gov.by/ru/bannerpage-gosprogramma-cifrovoe-razvitie-belarusi-na-2021-2025> (Accessed: 31.01.2024).
16. National Academy of Sciences of Belarus (2018) *Strategy «Science and technologies: 2018–2040»* [Online]. Available from: https://nasb.gov.by/congress2/strategy_2018-2040.pdf (Accessed: 31.01.2024).
17. Pravo.by (2021) *Resolution of the Council of the Ministers adopted on 23 April 2021 № 245 «On State programme «High technologies and engineering» for 2021–2025»* [Online]. Available from: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22100245> (Accessed: 31.01.2024).
18. State Committee on Science and Technology (2023) *Technoparks of the Republic of Belarus 2023* [Online]. Available from: <https://www.gknt.gov.by/upload/pdf/2023/tehnoparki-2023.pdf> (Accessed: 31.01.2024).
19. BELISA (2024) *Innovation infrastructure* [Online]. Available from: http://belisa.org.by/ru/nis/innovac_infrastr/ (Accessed: 31.01.2024).
20. HI Tech Park (2024) *Advantages and benefits* [Online]. Available from: <https://www.park.by/membership/advantages/> (Accessed: 31.01.2024).
21. Industrial Park Great Stone (2024) *Residents' registration* [Online]. Available from: <https://industrialpark.by/investoram/registratsiya-rezidentov/> (Accessed: 31.01.2024).

22. Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (2024) *About us* [Online]. Available from: https://www.fond.bas-net.by/obsved_.html (Accessed: 31.01.2024).
23. Belarusian Innovative Foundation (2024) *About us* [Online]. Available from: <https://belinfund.by/> (Accessed: 31.01.2024).
24. CIS official web-site (2020) *Interstate Programme of Innovation Cooperation of the CIS member states for the period up to 2030* [Online]. Available from: <https://e-cis.info/cooperation/3827/> (Accessed: 31.01.2024).
25. United Nations Economic Commission for Europe (2022) *Research and development expenditure as a proportion of GDP* [Online]. Available from: <https://w3.unece.org/SDG/ru/Indicator?id=123> (Accessed: 31.01.2024).
26. National Statistical Committee of the Republic of Belarus (2022) *On research and innovation activity in the Republic of Belarus in 2022* [Online]. Available from: https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/publications/izdania/public_bulletin/index_71088/ (Accessed: 31.01.2024).
27. Ministry of Economy of the Republic of Belarus (2017) *Belarus National Strategy of Sustainable Social & Economic Development – 2030* [Online]. Available from: <https://economy.gov.by/uploads/files/NSUR2030/Natsionalnaja-strategija-ustojchivogo-sotsialno-ekonomicheskogo-razvitiija-Respubliki-Belarus-na-period-do-2030-goda.pdf> (Accessed: 31.01.2024).
28. Belta.by (2023) *GKNT: v Belarusi obespecheno funkcionirovanie 25 sub#ektov innovacionnoj infrastruktury* [State Committee on Science and Technology: 25 subjects of innovation infrastructure work in Belarus] [Online]. Available from: <https://www.belta.by/society/view/gknt-v-belarusi-obespecheno-funktsionirovanie-25-subjektov-innovatsionnoj-infrastruktury-601722-2023/> (Accessed: 31.01.2024).

Информация об авторе:

Погорельская Анастасия Михайловна – кандидат исторических наук, доцент кафедры мировой политики Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: pogorelskaya@mail.tsu.ru; ORCID: 0000-0003-3003-4757

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the author:

Pogorelskaya Anastasia M., Cand.Sc. (History), Associate Professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: pogorelskaya@mail.tsu.ru; ORCID: 0000-0003-3003-4757

The author declares no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.02.2024; одобрена после рецензирования 07.04.2024; принята к публикации 30.10.2024

The article was submitted 05.02.2024; approved after reviewing 07.04.2024; accepted for publication 30.10.2024

Научный журнал

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

2024. № 6

Редактор К.Г. Шилько
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик Н.А. Глущенко
Дизайн обложки А.А. Аббасова

Подписано к печати 30.10.2024 г. Формат 60×84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 8; усл. печ. л. 7,4.
Тираж 500 экз. Заказ № 6060. Цена свободная.

Дата выхода в свет 08.11.2024 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru