

# МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

## METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 621.793.182  
DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-511-519

### ПРИМЕНЕНИЕ ЖЕРТВЕННЫХ СЛОЕВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МНОГОСЛОЙНОЙ Al-Ni-ФОЛЬГИ С ЭФФЕКТОМ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Д. Е. Шашин<sup>1\*</sup>, Н. И. Сушенцов<sup>1</sup>, А. Д. Дьячков<sup>1</sup>, А. Л. Романов<sup>1</sup>, К. А. Волков<sup>1</sup>,  
П. Г. Габдуллин<sup>2</sup>, О. Е. Квашенкина<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> SNDGroup, Санкт-Петербург, Россия

\* ShashinDE@volgattech.net

**Аннотация.** Рассматриваются особенности применения жертвенных слоев при изготовлении многослойной Al-Ni-фольги, характеризующейся эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Для того чтобы во время производства фольги не было отслоений, между подложкой и фольгой должна быть хорошая адгезия. С другой стороны, для изготовления конечного продукта фольгу необходимо с поверхности подложки отслоить, что подразумевает низкую степень адгезии. Разрешить это технологическое противоречие возможно, применяя жертвенные слои, то есть пленки материала, который наносится на подложку перед формированием фольги, а затем растворяется или стравливается, разрушая тем самым физическую связь фольги и подложки. По этой причине особенно актуальным становится исследование применения различных материалов в качестве жертвенных слоев при изготовлении многослойной фольги с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Предложен вариант компоновки магнетронной распылительной системы, позволяющий использовать шесть магнетронов в едином технологическом цикле формирования многослойной структуры Al-Ni. С помощью электронной микроскопии определена толщина полученной фольги. Показано, что применение в качестве жертвенного слоя пленки поливинилового спирта толщиной 30 мкм позволяет отслаивать многослойную Al-Ni-фольгу без механического повреждения и утраты способности к реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

**Ключевые слова:** магнетронное распыление, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, жертвенные слои, реактивная фольга, рентгеноструктурный анализ

**Ссылка для цитирования:** Шашин Д. Е., Сушенцов Н. И., Дьячков А. Д., Романов А. Л., Волков К. А., Габдуллин П. Г., Квашенкина О. Е. Применение жертвенных слоев при изготовлении многослойной Al-Ni-фольги с эффектом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 6. С. 511–519. DOI: 10.17586/0021-3454-2 025-68-6-511-519.

### APPLICATION OF SACRIFICIAL LAYERS IN THE MANUFACTURE OF MULTILAYER Al-Ni FOIL WITH THE EFFECT OF SELF-EXPANDING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS

D. E. Shashin<sup>1\*</sup>, N. I. Sushentsov<sup>1</sup>, A. D. Dyachkov<sup>1</sup>, A. L. Romanov<sup>1</sup>, K. A. Volkov<sup>1</sup>,  
P. G. Gabdullin<sup>2</sup>, O. E. Kvashenkina<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> SNDGroup LLC, St. Petersburg, Russia

\* ShashinDE@volgattech.net

**Abstract.** The features of the use of sacrificial layers in the manufacture of multilayer Al–Ni foil, characterized by the effect of self-expanding high-temperature synthesis, are considered. In order to avoid peeling during the foil production,

there must be good adhesion between the substrate and the foil. On the other hand, to produce the final product, the foil must be peeled off the surface of the substrate, which implies a low degree of adhesion. It is possible to resolve this technological contradiction by using sacrificial layers, that is, films of material that are applied to the substrate before forming the foil, and then dissolved or etched off, thereby destroying the physical bond between the foil and the substrate. For this reason, it is particularly relevant to study the use of various materials as sacrificial layers in the manufacture of multilayer foils with the effect of self-expanding high-temperature synthesis. A variant of the layout of a magnetron sputtering system is proposed, which makes it possible to use six magnetrons in a single technological cycle for the formation of a multilayer Al–Ni structure. The thickness of the obtained foil is determined using electron microscopy. It is shown that the use of a polyvinyl alcohol film with a thickness of 30 microns as a sacrificial layer makes it possible to peel off multilayer Al–Ni foil without mechanical damage and loss of the ability to react with self-expanding high-temperature synthesis.

**Keywords:** magnetron sputtering, self-propagating high-temperature synthesis, sacrificial layers, reactive foil, X-ray diffraction analysis

**For citation:** Shashin D. E., Sushentsov N. I., Dyachkov A. D., Romanov A. L., Volkov K. A., Gabdullin P. G., Kvashenkina O. E. Application of sacrificial layers in the manufacture of multilayer Al–Ni foil with the effect of self-expanding high-temperature synthesis. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 6. P. 511–519 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-6-511-519.

**Введение.** Реактивная многослойная фольга — это относительно новый вид энергетического материала, гетерогенная структура которого [1–4] содержит чередующиеся тонкие слои, по крайней мере, двух компонентов, причем ее общая толщина составляет от 0,1 до 300 мкм [1, 2]. На практике компоненты, входящие в состав фольги, выбираются на основе способности выделять тепло при протекании реакции самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Использование сфокусированного оптического луча, механического стилуса, источников температуры или напряжения может инициировать реакцию СВС в многослойной фольге, что приведет к смешиванию слоев двух компонентов фольги с выделением тепла. Это тепло распространяется в соседние, непрореагировавшие, слои фольги, вызывая самораспространяющуюся реакцию. На данном этапе развития техники среди всего многообразия материалов, которые вступают в реакцию СВС (рис. 1), в качестве компонентов фольги наиболее часто используют пару Al–Ni [5, 6], которая не обладает самыми высокими температурой горения  $T$  и молярной энергией  $Q$  (рис. 1), однако свойства и технологии получения пленок этих металлов различными вакуумными способами хорошо изучены.

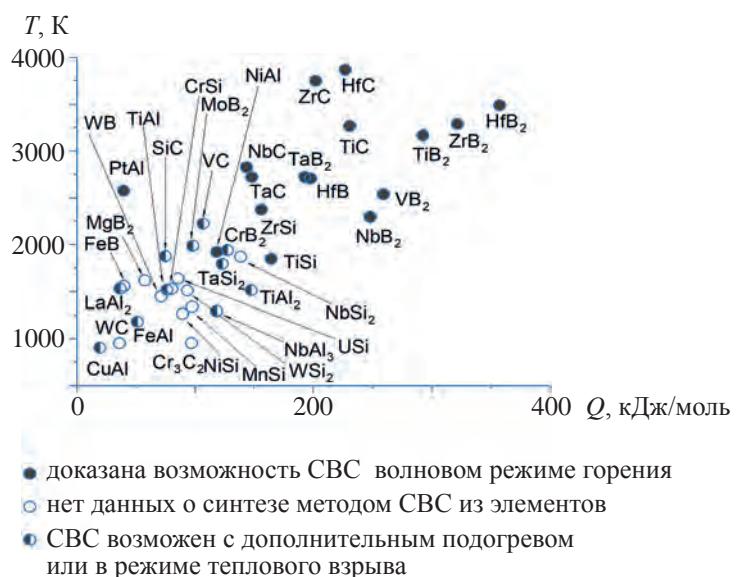


Рис. 1

Магнетронное распыление вследствие относительно невысокой температуры роста пленок, возможности контроля и влияния на основные технологические параметры в широких диапазонах остается наиболее применяемой технологией изготовления многослойной фольги [7–10],

однако при реализации этого метода возникает технологическое противоречие: для того чтобы длительный процесс формирования фольги прошел без отслоений, между подложкой и фольгой должна быть хорошая адгезия. С другой стороны, для изготовления конечного продукта фольгу необходимо с поверхности подложки отслоить, что подразумевает низкую степень адгезии. Преодолеть это технологическое противоречие возможно, применяя жертвенные слои, то есть материал, который наносится на подложку перед формированием фольги, а затем растворяется или стравливается, разрушая тем самым физическую связь фольги и подложки [10–14].

Целью настоящей работы является определение возможности применения различных материалов в качестве жертвенных слоев при изготовлении с помощью метода магнетронного распыления многослойной фольги, характеризующейся эффектом СВС.

**Формирование образцов.** Многослойная фольга изготавливается магнетронным распылением на установке с шестью магнетронами (M1–M6) и ионным источником (ИИ). Установка магнетронного распыления включает систему получения вакуума на основе пластинчато-роторного насоса, насоса Рутса и высоковакуумного турбомолекулярного насоса [15, 16]. На четырех магнетронах были установлены алюминиевые мишени, на двух — никелевые с добавлением ванадия. Ванадий в составе мишени необходим для снижения ферромагнитной активности никеля, что является важным моментом при магнетронном распылении, так как для ферромагнитных материалов требуется более высокие значения напряжения и тока, что нежелательно при формировании фольги из-за риска протекания реакции СВС в ходе роста. Подложки крепились на призматический девятиугольный охлаждаемый подложкодержатель [17, 18]. В качестве подложек были использованы листы из полированной нержавеющей стали. Эскиз, поясняющий способ формирования фольги, представлен на рис. 2 [19–21].

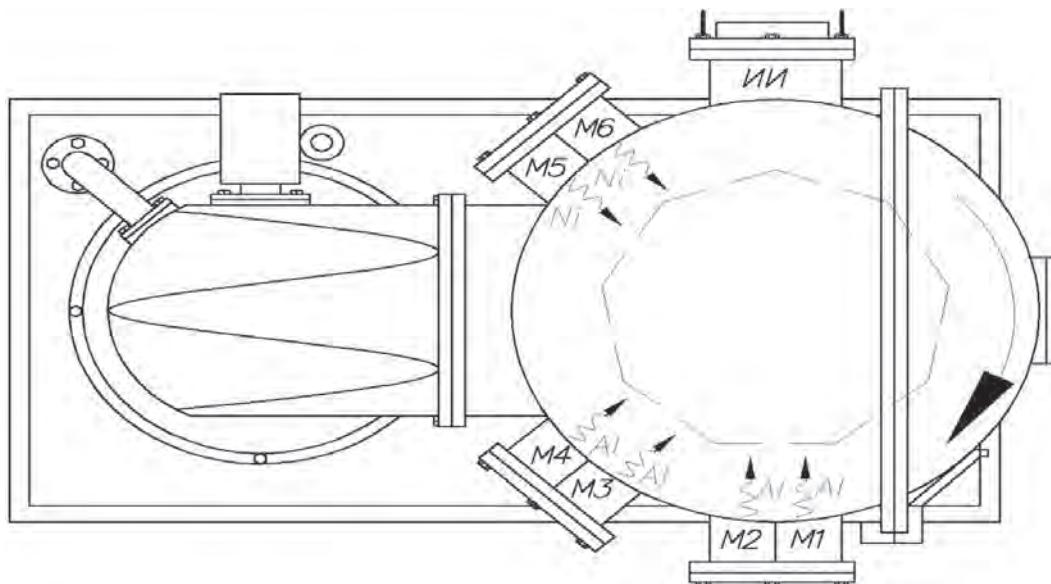


Рис. 2

Полученные образцы многослойной фольги подвергались рентгеноструктурному анализу на дифрактометре. Анализ проводился в интервале угла падения рентгеновского луча  $2\Theta = 10\text{--}80^\circ$  (шаг  $0,02^\circ$ ) со скоростью  $2^\circ/\text{мин}$ . Рентгенофазовый анализ показал, что фольга состоит преимущественно из NiV и Al, однако есть следы присутствия AlNi (менее 1 % — свидетельство того, что некоторое количество материалов образовало интерметаллид вследствие наличия термической диффузии). Дифрактограмма образца представлена на рис. 3 (I — интенсивность).

В полученной фольге стабильно протекала реакция СВС при приложении напряжения 9 В. Толщина образцов, согласно данным электронной микроскопии, составляла около 12 мкм (рис. 4).

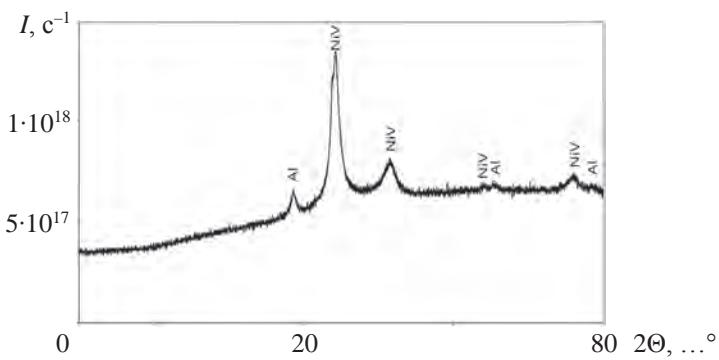


Рис. 3

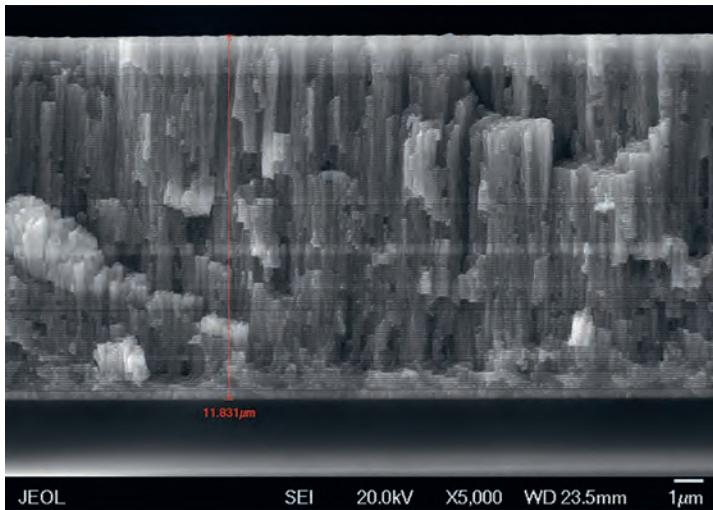


Рис. 4

**Исследование жертвенных слоев.** В ходе проведения исследований были опробованы метод, предполагающий удаление подслоя, и метод с растворяющейся подложкой многослойной Al–Ni-фольги.

В качестве жертвенных слоев были использованы: покрытие из раствора соли, фоторезист, тонкая пленка меди, мыльное покрытие, пленка поливинилового спирта, слой желатина, силиконовая смазка повышенной чистоты, покрытие из раствора солей калия и натрия. Для удаления загрязнений с подложек перед нанесением жертвенного слоя применялись очистка в ультразвуковой ванне и протирка безворсовой ветошью с раствором этилового спирта. Далее рассмотрены особенности применения различных материалов жертвенного слоя.

1) Раствор NaCl. 35 %-ный раствор соли кистью наносился на очищенную подложку так, чтобы раствор полностью покрывал поверхность подложки. После полного высыхания на подложках оставалась пленка из соли с небольшими кристаллами. Многослойная фольга была сформирована на слое соли. После формирования фольги готовые образцы опускались в воду комнатной температуры (под небольшим углом к поверхности воды). Результат — пленка отходит небольшими кусками.

2) Медь. Пленка отделялась от подложки посредством травления подслоя. В данном случае на подложке из нержавеющей стали была сформирована пленка меди толщиной 1 мкм, затем на ней формировалась многослойная фольга. После осаждения структуры подложка помещалась в травильный раствор. Состав травильного раствора: 3 %-ный раствор перекиси водорода (100 мл), лимонная кислота (30 г), поваренная соль (5 г). Результат — структура травится в растворе вместе с медью.

3) Фоторезист. На подложки был нанесен слой фоторезиста ФП383 методом центрифугирования, который задубливался 10 мин в сушильном шкафу при температуре 120 °C. На слой фо-

торезиста осаждалась структура. После формирования фольги подложки из нержавеющей стали растворялись в ацетоне и диоксане. Результат — пленка отслаивается небольшими кусками.

4) Мыльное покрытие. Формировалось на подложках следующими способами: нанесение мыльного раствора валиком, губкой, окуранием и натирание куском мыла с последующим растиранием. Наиболее ровное покрытие вручную было получено методом натирания. Результат — по мере растворения слоя мыла пленка отслаивается в виде мелких частиц.

5) Пленки, изготовленные на основе поливинилового спирта, имеют такие преимущества, как растворимость в воде, устойчивость к большинству органических растворителей, прозрачность, достаточная гибкость. Использовались пленки поливинилового спирта с гладкой поверхностью (толщиной 30 мкм) и перфорированные с одной стороны (75 мкм). Пленки размером  $200 \times 300$  мм крепились на охлаждаемый подложкодержатель. Образцы с осажденной многослойной структурой помещались в дистиллированную воду (температура 23 °C). После растворения поливинилового спирта фольга вынималась из воды и просушивалась. Результат — после полного растворения подложки фольга остается в воде в виде больших фрагментов.

6) Желатин растворялся в воде и наносился с помощью ручного пульверизатора (химически чистый желатин медицинского применения растворяется в теплой воде при 40 °C в количестве 50 г на литр воды). Затем подложки помещались в сушильный шкаф при температуре 55 °C. После формирования на желатиновом слое многослойной фольги подложки помещались в дистиллированную воду для растворения жертвенного слоя и снятия фольги. Результат — длительный процесс растворения.

7) Силиконовая смазка повышенной чистоты наносилась распылением из баллончика, в который была упакована при производстве. Данный материал показал очень слабую адгезию выращиваемой фольги к подложке. Результат — формируемая фольга отслаивалась в процессе роста.

8) Соли натрия и калия ( $\text{NaCl}$  — 5 % и  $\text{KCl}$  — 2,5 %). Раствор наносился погружением и с помощью пульверизатора. При использовании солей в качестве жертвенного слоя в растворы добавляли ПАВ. Результат — сформированная фольга частично отслаивается, однако при удачном формировании (без отслаивания) многослойной фольги удавалось в горячей воде снять пленку со всей площади подложки.

Стоит отметить, что во всех случаях отделенная фольга сохраняла свои рабочие свойства.

У образцов с подслоем  $\text{NaCl}$  по мере растворения соли в пленке образовывались отверстия в местах, где находились кристаллы (рис. 5), из-за чего пленка отходила небольшими кусками. Для образцов с подслоем фоторезиста ФП383 наблюдалось отслоение структуры также небольшими кусками. В случае образцов с подслоем мыла растворение подслоя сопровождалось одновременным отслоением структуры в виде мелких частиц, т. е. при использовании данных методов возникает проблема равномерного нанесения покрытия на относительно большие участки. В случае подслоя меди наблюдалось травление как слоя меди, так и самой структуры.

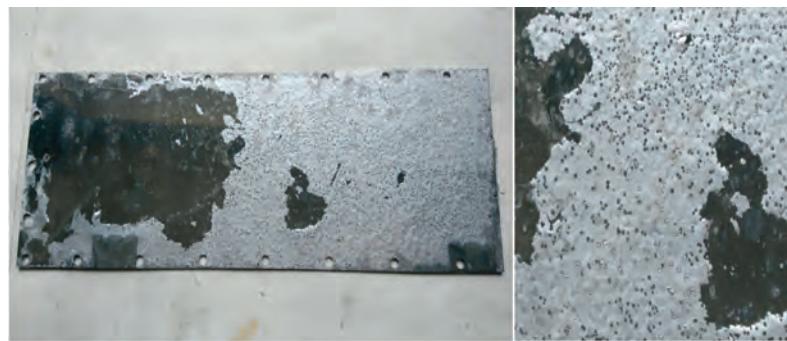


Рис. 5

На подложки из поливинилового спирта фольга осаждалась равномерно, она имела достаточную адгезию (рис. 6). По мере растворения поливинилового спирта осажденная пленка

начинала свободно перемещаться в воде. Основной проблемой данного метода является то, что в процессе формирования фольги пленки поливинилового спирта сжимаются и растягиваются при изменении температуры. Это приводит к дефектам в структуре фольги (коробление пленок и трещины в ней). При различных механических свойствах пленки и подложки возникают растягивающие и сжимающие напряжения вдоль границы раздела пленка–подложка. Особенно это заметно при попытке вырастить фольгу большей толщины. Также полученные Al–Ni-пленки имели большие внутренние напряжения, что приводило к скручиванию фольги в воде при растворении поливинилового спирта. При формировании фольги на пленке поливинилового спирта важно обеспечить плотный и равномерный контакт с охлаждаемым подложкодержателем, что позволяет избежать ее деформации при реализации технологического процесса.



Рис. 6

**Заключение.** В ходе формирования многослойных Al–Ni-структур с СВС методом магнетронного распыления на подложках с нанесенными жертвенными слоями была получена фольга толщиной около 12 мкм (состоящая преимущественно из NiV и Al со следами Al–Ni). Экспериментальные исследования показали, что от приложенного к фольге напряжения в 9 В возникает реакция СВС.

Исследование показало, что использование в качестве жертвенного слоя пленки поливинилового спирта толщиной 30 мкм, смеси солей калия и натрия совместно с ПАВ, а также желатина позволяет отслаивать многослойную Al–Ni-фольгу без механического повреждения и утраты способности к реакции СВС. Несмотря на полученные положительные результаты, отработка технологического процесса снятия фольги с помощью жертвенного слоя требует доработки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рогачев А. С. Реакционные многослойные нанопленки: время научно-технологической зрелости // Успехи химии. 2024. Т. 93, № 1. С. RCR5106. DOI: 10.59761/RCR5106.
2. Рогачев А. С. Волны экзотермических реакций в многослойных нанопленках // Успехи химии. 2008. Т. 77, № 1. С. 22–38. DOI: <https://doi.org/10.1070/RC2008v077n01ABEH003748>.
3. Baras F., Turlo V., Politano O. et al. SHS in Ni/Al Nanofoils: A Review of Experiments and Molecular Dynamics Simulations // Adv. Eng. Mater. 2018. Vol. 20, N 8. DOI: 10.1002/adem.201800091.
4. Adams D. P. Reactive multilayers fabricated by vapor deposition: A critical review // Thin Solid Films. 2015. Vol. 576, N 2. P. 98–128. DOI: 10.1016/j.tsf.2014.09.042.
5. Turlo V., Politano O., Baras F. Modeling self-sustaining waves of exothermic dissolution in nanometric Ni-Al multilayers // Acta Materialia. 2016. Vol. 120. P. 189–204. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.03.020.
6. Weihs T. P. Fabrication and characterization of reactive multilayer films and foils // Met. Films for Elect., Opt. and Magn. Apps.: Struc., Proc. and Props. 2014. P. 160–243. DOI: 10.1533/9780857096296.1.160.

7. *Xanthopoulou G.* Some Advanced Applications of SHS: An Overview // Intern. J Self-Propag. High-Temp. Synth. 2011. Vol. 20, N 4. P. 269–272. DOI: 10.3103/S1061386211040133.
8. *Kovalev D. Yu., Ponomarev V. I.* Time-Resolved X-Ray Diffraction in SHS Research and Related Areas: An Overview // Intern. J. Self-Propag. High-Temp. Synth. 2019. Vol. 28, N 2. P. 114–123. DOI: 10.3103/S1061386219020079.
9. *Shashin D. E., Sushentsov N. I.* Development of Manufacturing Technology of Photo-Dielectric Sensitive Element of Ultraviolet Range on the Basis of Thin Films of Zinc Oxide // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2019. Т. 129, № 6. С. 99–109. DOI: 10.18698/0236-3933-2019-6-99-109.
10. *Шашин Д. Е., Степанов С. А., Сушенцов Н. И.* Формирование и исследование тонкопленочных структур на основе оксида меди и оксида цинка, получаемых методом реактивного магнетронного распыления, для применения в солнечной энергетике // Вестн. Поволжского гос. техн. ун-та. Сер.: Радиотех. и инфоком. сист. 2017. Т. 35, № 3. С. 69–77. DOI: 10.15350/2306-2819.2017.3.69.
11. *Shashin D. E., Sushentsov N. I.* Obtaining thin metal films and their compounds using magnetron sputtering and arc evaporation in a single technological cycle // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2059, N 1. DOI: 10.1088/1742-6596/2059/1/012022.
12. *Шашин Д. Е., Сушенцов Н. И., Дьячков А. Д.* и др. Применение магнетронного распыления для формирования многослойных структур AlNi // Вакуумная техника и технология–2023. СПб: Изд-во СПбГЭТУ „ЛЭТИ“. 2023. С. 180–184. EDN: AZOEI.
13. *Хина Б. Б., Бабюк В. Е., Габдуллин П. Г.* и др. Новый метод расчета адиабатической температуры СВС в системе Ni-а // XII Междунар. Курнаковское сов. по физ.-хим. анал. СПб: Политех-Пресс, 2022. С. 78–80. EDN: RUVNBW.
14. *Kvashenkina O. E., Udovenko S. A., Osipov V. S. et al.* Study of long-term post-SHS phase kinetics in Ni/Al reactive multilayer nanofoils // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. Vol. 1695. DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012181.
15. *Kvashenkina O. E., Gabdullin P. G., Arkhipov A. V.* SmartFoil: a Novel Assembly Technology for Electronic Circuit Boards in Multifunctional Units // 2018 IEEE Intern. Conf. on Elect. Engineering and Photonics. IEEE. 2018. P. 202–206. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564437.
16. *Белянин А. Ф., Борисов В. В., Сушенцов Н. И.* и др. Влияние термической обработки на строение и характеристики автоэмиссионных катодов на слоистых структурах нитрида титана и углеродных наностенок // Нанотехнологии: разработка, применение — XXI век. 2017. Т. 9, № 1. С. 4–11. EDN: ZCJBAH.
17. *Квашенкина О. Е., Эйдельман Е. Д., Осипов В. С.* и др. Оценка максимального поперечного размера многослойных биметаллических пленок для протекания в них самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на примере структуры Ni/Al // ЖТФ. 2020. Т. 90, № 7. С. 1189–1194.
18. *Kvashenkina O. E., Gabdullin P. G., Osipov V. S.* Using the novel capable of SHS-reaction multilayer nanostructured material for soldering of lead-zirconate-titanate piezoceramic elements // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1236. DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012023.
19. *Шашин Д. Е., Дьячков А. Д.* Формирование фотокаталитических пленок TiO<sub>2</sub> методом реактивного магнетронного распыления с применением квазизамкнутого пространства // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2024. Т. 148, № 3. С. 75–90.
20. *Шашин Д. Е.* Разработка математической модели формирования тонких пленок оксида цинка с заданными значениями комплексной диэлектрической проницаемости // Вестн. Поволжского гос. техн. ун-та. Сер.: Радиотех. и инфоком. сист. 2018. Т. 40, № 4. С. 74–81. DOI: 10.15350/2306-2819.2018.4.74.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дмитрий Евгеньевич Шашин**

— канд. техн. наук, доцент; Поволжский государственный технологический университет, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; доцент; E-mail: ShashinDE@volgatech.net

**Николай Иванович Сушенцов**

— канд. техн. наук, доцент; Поволжский государственный технологический университет, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; зав. кафедрой; E-mail: SushentsovNI@volgatech.net

**Алексей Дмитриевич Дьячков**

— аспирант; Поволжский государственный технологический университет, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; E-mail: addyachkov@gmail.com

**Кирилл Александрович Волков**

— аспирант; Поволжский государственный технологический университет, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; E-mail: VolkovKA@volgatech.net

**Алексей Леонидович Романов**

— магистрант; Поволжский государственный технологический университет, кафедра конструирования и производства радиоаппаратуры; E-mail: RomanovAl@volgatech.net

**Павел Гарифович Габдуллин**

— канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Высшая инженерно-физическая школа, Институт электроники и телекоммуникаций; доцент; E-mail: gabdullin\_pg@spbstu.ru

**Ольга Евгеньевна Квашенкина**

— канд. физ.-мат. наук, доцент; СНДГрупп; генеральный директор; E-mail: info@sndgroup.ru

Поступила в редакцию 05.11.24; одобрена после рецензирования 19.11.24; принятая к публикации 25.04.25.

#### REFERENCES

1. Rogachev A.S. *Russian Chemical Reviews*, 2024, no. 1(93), pp. RCR5106, DOI: 10.59761/RCR5106. (in Russ.)
2. Rogachev A.S. *Russian Chemical Reviews*, 2008, no. 1(77), pp. 21–37, DOI: 10.1070/RC2008v077n01ABEH003748. (in Russ.)
3. Baras F., Turlo V., Politano O. et al. *Adv. Eng. Mater.*, 2018, no. 8(20), DOI: 10.1002/adem.201800091.
4. Adams D.P. *Thin Solid Films*, 2015, no. 2(576), pp. 98–128, DOI: 10.1016/j.tsf.2014.09.042.
5. Turlo V., Politano O., Baras F. *Acta Materialia*, 2016, vol. 120, pp. 189–204, DOI: 10.1063/1.4745201.
6. Weihs T.P. *Met. Films for Elect., Opt. and Magn. Apps.: Struc., Proc. and Props.*, 2014, pp. 160–243, DOI: 10.1533/9780857096296.1.160.
7. Xanthopoulou G. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.*, 2011, no. 4(20), pp. 269–272, DOI: 10.3103/S1061386211040133.
8. Kovalev D.Yu., Ponomarev V.I. *Int. J. Self-Propag. High-Temp. Synth.*, 2019, no. 2(28), pp. 114–123, DOI: 10.3103/S1061386219020079.
9. Shashin D.E., Sushentsov N.I. *Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ. Series Instr. Engin.*, 2019, no. 6(129), pp. 99–109, DOI: 10.18698/0236-3933-2019-6-99-109. (in Russ.)
10. Shashin D.E., Stepanov S.A., Sushentsov N.I. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2017, no. 3(35), pp. 69–77, DOI: 10.15350/2306-2819.2017.3.69. (in Russ.)
11. Shashin D.E., Sushentsov N.I. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, no. 1(2059), DOI: 10.1088/1742-6596/2059/1/012022.
12. Shashin D.E., Sushentsov N.I., Dyachkov A.D. et al. *Vacuum Engineering and Technology*, 2023, pp. 180–184. (in Russ.)
13. Khina B.B., Babyuk V.E., Gabdullin P.G. et al. *XII Mezhdunarodnoye kurnakovskoye soveshchaniye po fiziko-khimicheskemu analizu* (XII International Kurnakov Conference on Physicochemical Analysis), St. Petersburg, 2022, pp. 78–80. (in Russ.)
14. Kvashenkina O.E., Udoenko S.A., Osipov V.S. et al. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1695, DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012181.
15. Kvashenkina O.E., Gabdullin P.G., Arkhipov A.V. *2018 IEEE Intern. Conf. on Elect. Engineering and Photonics*, 2018, pp. 202–206, DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564437.
16. Belyanin A.F., Borisov V.V., Sushentsov N.I., Stepanov S.A., Shashin D.E. *Nanotechnology: Development and Applications — XXI Century*, 2017, no. 1(9), pp. 4–11, EDN: ZCJBAH. (in Russ.)
17. Kvashenkina O.E., Eidelman E.D., Osipov V.S., Gabdullin P.G., Khina B.B. *Technical Physics*, 2020, no. 7(65), pp. 1144–1149.
18. Kvashenkina O.E., Gabdullin P.G., Osipov V.S. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1236, DOI: 10.1088/1742-6596/1236/1/012023.
19. Shashin D.E., Dyachkov A.D. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2024, no. 3 (148), pp. 75–90. (in Russ.)
20. Shashin D.E. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems*, 2018, no. 4(40), pp. 74–81, DOI: 10.15350/2306-2819.2018.4.74. (in Russ.)

#### DATA ON AUTHORS

**Dmitriy E. Shashin**

— PhD, Associate Professor; Volga State University of Technology, Department of Design and Manufacture of Radio Equipment; E-mail: ShashinDE@volgatech.net

**Nikolay I. Sushentsov**

— PhD, Associate Professor; Volga State University of Technology, Department of Design and Manufacture of Radio Equipment; Head of the Department; E-mail: SushentsovNI@volgatech.net

**Aleksei D. Dyachkov**

— Post-Graduate Student; Volga State University of Technology, Department of Design and Manufacture of Radio Equipment; E-mail: addyachkov@gmail.com

**Alexey L. Romanov**

- Master's Student; Volga State University of Technology, Department of Design and Manufacture of Radio Equipment;  
E-mail: RomanovAl@volgattech.net

**Kirill A. Volkov**

- Post-Graduate Student; Volga State University of Technology, Department of Design and Manufacture of Radio Equipment;  
E-mail: VolkovKA@volgattech.net

**Pavel G. Gabdullin**

- PhD, Associate Professor; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Higher School of Engineering Physics, Institute of Electronics and Telecommunications; E-mail: gabdullin\_pg@spbstu.ru

**Olga E. Kvashenkina**

- PhD, Associate Professor; SNDGroup LLC; General Manager;  
E-mail: info@sndgroup.ru

Received 05.11.24; approved after reviewing 19.11.24; accepted for publication 25.04.25.