

DOI: 10.47188/0869-5326\_2022\_30\_4\_29

УДК 621.793.3

## Формирование функциональных металлооксидных покрытий пиролизом карбоксилатов металлов

© 2022, С.В. Стаханова, Н.В. Свириденкова,  
Е.И. Тимчишина, А.А. Постников, А.Ф. Жуков

Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, 125047, Москва, Миусская пл., 9. Тел. +7 (499) 978-86-60, e-mail: stakhanova.s.v@muctr.ru

Покрытие поверхностей стекла, алюминия и углеродной ткани оксидами никеля, цинка, железа, хрома и марганца проведено методом CSD из растворов карбоксилатов соответствующих металлов. Для получения карбоксилатов использовали неодакановую кислоту, содержащую четвертичный атом углерода в  $\alpha$ -положении, что позволило проводить пиролиз при температуре не выше 350 °С. В результате пиролиза формируются тонкие сплошные пленки гематита, эсколаита, бунзенига, ZnO гексагональной сингонии и  $Mn_2O_3$  кубической сингонии с равномерным распределением элементов по поверхности субстратов в том числе и со сложным рельефом. Нанесение оксида марганца на пористую углеродную ткань может быть использовано для создания электродных материалов суперконденсаторов с повышенными ёмкостными характеристиками за счет участия фарадеевских механизмов в процессах накопления энергии.

Ключевые слова: оксидные покрытия, функциональные покрытия, металлооксидные пленки, метод CSD, электродный материал, суперконденсатор

UDC 621.793.3

## Formation of functional metal oxide coatings by metal carboxylates pyrolysis

© 2022 S.V. Stakhanova, N.V. Sviridenkova, E.I. Timchishina,  
A.A. Postnikov, A.F. Zhukov

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, 125047, Miusskya Sq., 9. Phone: +7 (499) 978-86-60, e-mail: stakhanova.s.v@muctr.ru

Coating of glass, aluminum, and carbon cloth with nickel, zinc, iron, chromium, and manganese oxides was carried out by the CSD method from carboxylate solutions of the corresponding metals. Neodecanoic acid containing a quaternary carbon atom at the  $\alpha$ -position was used to obtain carboxylates. Thermal instability of such compounds makes it possible to carry out pyrolysis at temperatures not exceeding 350

°C. Thin continuous films of hematite, eskolaite, bunsenite, hexagonal ZnO and  $Mn_2O_3$  with cubic structure are formed as a result of pyrolysis, and uniform distribution of elements is observed on surfaces even with complex relief. The deposition of manganese oxide on a porous carbon cloth can be used to create electrode materials for supercapacitor with enhanced capacitance characteristics due to the participation of faradic redox reactions in energy storage processes.

Keywords: oxide coatings, functional coatings, metal oxide films, CSD method, electrode material, supercapacitor

### Введение

Тонкие пленки оксидов металлов, нанесенные на поверхности металлических и неметаллических материалов, находят все возрастающее применение в качестве защитных и функциональных покрытий [1]. Для защиты поверхности металлов используются традиционные и разрабатываются новые электрохимические способы формирования металлоксидных покрытий [2,3], наряду с которыми в последние годы все активнее применяются и химические подходы [4-6]. Широкие перспективы открывает использование пленок оксидов металлов в качестве функциональных покрытий. Такие оксиды как  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ , ZnO, CuO,  $Cr_2O_3$  служат основой для получения полупроводниковых, фотокаталитических, бактерицидных и антивирусных биоактивных покрытий [7-10].

Особую роль играют металлоксидные покрытия в создании новых материалов для химических источников тока и накопителей энергии. Так, тонкие аморфные пленки  $Ta_2O_5$  электрохимически формируют в качестве диэлектрических слоев на поверхности объемно-пористых анодов высокоёмких танталовых конденсаторов [11], пленки сложных оксидов переходных металлов используют в качестве электролитов в твердооксидных топливных элементах [12], тонкие пленки оксида никеля, обогащенного изотопом  $^{63}Ni$ , наносят на высокоразвитую кремниевую поверхность при изготовлении бета-вольтаических батарей [13,14]. Использование нанополеночных или наноструктурированных  $RuO_2$ , NiO,  $MnO_2$ ,  $Fe_2O_3$ , нанесенных на пористые углеродные материалы, в составе электродов суперконденсаторов (СК) позволяет значительно увеличить ёмкостные и энергетические характеристики этих устройств [15, 16].

Для формирования покрытий оксидами металлов часто используют такие физические методы как импульсное лазерное напыление, катодное и магнетронное напыление [11,12,17]. Необходимым условием физического осаждения плёнок является создание в рабочей камере высокого вакуума, поэтому стоимость нанесения покрытий этими методами довольно высока. Получение оксидов

химическими методами привлекательно прежде всего с точки зрения аппаратной простоты процесса. Одним из самых распространенных среди химических методов является золь-гель метод, позволяющий получать оксидные покрытия высокой чистоты из алкоксидов соответствующих элементов в водной среде. Однако при формировании оксидных покрытий этим методом трудно избежать пористости и трещиноватости образующихся пленок из-за капиллярных напряжений и усадки влажного геля при высыхании [5,18]. Этого недостатка лишен метод получения пленок из жидких растворов реагентов (Chemical Solution Deposition — CSD) [19-21]. Принципиальное отличие метода CSD в том, что процесс удаления растворителя при пиролизе и разложение соединения металла с органическим лигандом протекают одновременно, причем, как показано, в случае карбоксилатов металлов, образованных высшими кислотами, происходит предварительное плавление этих соединений, следовательно, происходит разложение расплава, а не твердой фазы прекурсора. Это позволяет получать сплошные бездефектные пленки толщиной от нескольких нанометров без пор и трещин. Однако для расширения возможностей данного метода остается актуальным вопрос разработки легко разлагающихся жидких прекурсоров, хорошо смачивающих поверхность субстрата.

Целью работы было нанесение покрытий оксидов никеля, цинка, железа, хрома и марганца на поверхность стекла, алюминия и углеродной ткани методом CSD из растворов карбоксилатов соответствующих металлов, причем для получения карбоксилатов использовали неодакановую кислоту, содержащую четвертичный атом углерода в  $\alpha$ -положении.

### Материалы и методы исследования

Нанесение пленок оксидов никеля, цинка, железа, хрома и марганца на различные поверхности проводили методом пиролиза растворов карбоксилатов соответствующих металлов в высших карбоновых кислотах (ВКК). Использовали октано-

вую кислоту (99%, Acros Organics) и неодакановую кислоту (prime grade, ABCR) без предварительной очистки. Для приготовления растворов карбоксилатов 0,25 М водные растворы нитратов никеля(II), железа(III), хрома(III), марганца(II), и сульфата цинка интенсивно встряхивали в делительной воронке в течение 10 мин. с ВКК в соотношении 2:1 по объему, постепенно повышая pH до значения 5,5-8,0 добавлением водного раствора аммиака, в результате чего катионы металлов экстрагировались в органическую фазу. Экстракт, представляющий собой раствор карбоксилата соответствующего металла в ВКК, выдерживали над водным раствором в течение суток, после чего отделяли от него и фильтровали через фильтр «Белая лента». Для получения карбоксилатов цинка использовали смесь неодакановой и октановой кислот в объемном соотношении 4:1, в остальных случаях применяли только неодакановую кислоту.

Полученные растворы использовали для нанесения пленок оксидов на стеклянную, сапфировую подложки, алюминиевую фольгу и углеродную ткань «Бусофит-Т». Поверхность стекла, сапфира и алюминия предварительно промывали этанолом, затем на нагретую до 50 °С поверхность наносили с помощью дозатора 0,1 мл раствора карбоксилата, выдерживали до полного растекания и подвергали термообработке при 450 °С в течение 2 минут на керамической электроплитке. На углеродную ткань раствор карбоксилата наносили методом окунания и вытягивания из раствора, а затем подвергали термообработке при 350 °С в течение 2 минут, используя в качестве подложки алюминиевую фольгу. Для получения пленок необходимой толщины процесс нанесения карбоксилатов на различные поверхности повторяли от трех до десяти раз.

Термогравиметрический анализ растворов карбоксилатов проводили с помощью анализатора TGA 2 (Меттлер Толодо). Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и рентгеноспектральный макроанализ (РСМА) пленок оксидов проводили с помощью электронного микроскопа TESCAN VEGA Compact. Рентгеновская съемка выполнена на дифрактометре Rigaku SmartLab SE на Cu K $\alpha$ -излучении по Бреггу-Брентано в интервале углов от 10 до 80° по 2 $\theta$ , а также плоскопараллельным пучком от 10 до 119°. Фазовый анализ проводили с использованием базы данных JCPDS ICDD-PDF-2.

### Результаты и их обсуждение

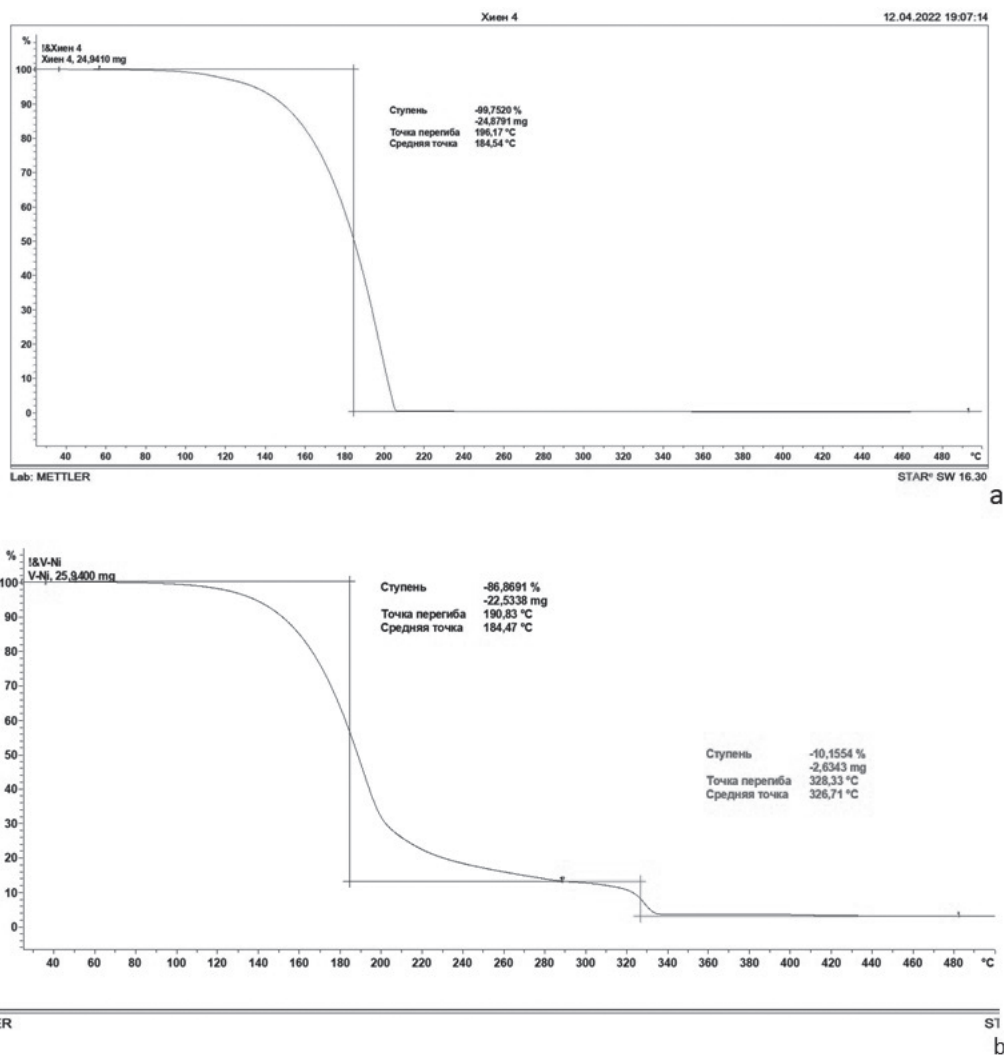
Для реализации метода CSD в настоящей работе применяли экстракционно-пиролитический подход, который предусматривает получение карбоксилатов металлов в качестве прекурсо-

ров для последующего пиролиза путем экстракции катионов металлов из водных растворов их солей соответствующими жидкими ВКК [20,21]. При использовании избыточного количества ВКК образующиеся экстракты представляют собой растворы карбоксилатов металлов в ВКК. В данной работе для получения карбоксилатов было предложено использовать неодакановую кислоту (НДК), имеющую разветвленный углеродный скелет и четвертичный  $\alpha$ -атом углерода, поскольку именно такие кислоты наиболее легко подвергаются при нагревании декарбоксилированию, а их соли – пиролизу.

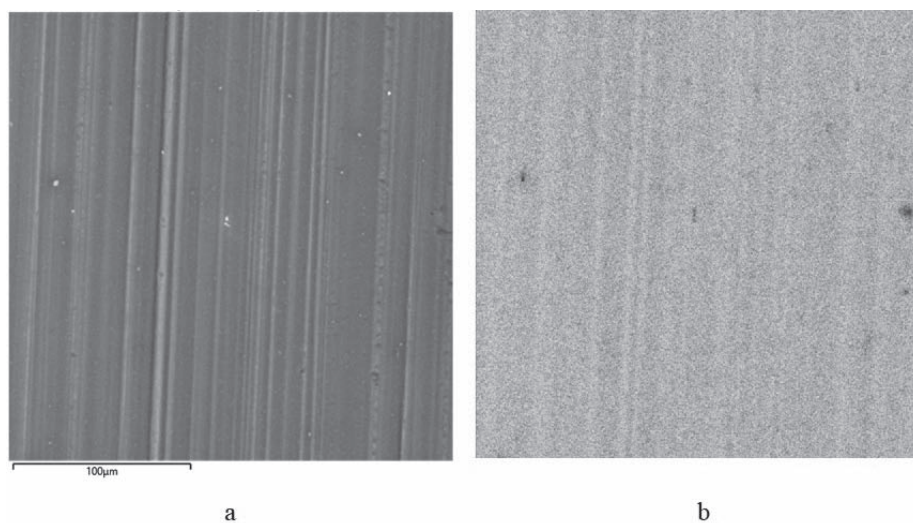
Растворы карбоксилатов никеля(II), хрома(III) и железа(III) были получены в виде вязких жидкостей, окрашенных в зеленый, сине-зеленый, красновато-коричневый цвет, растворы карбоксилата цинка являются неокрашенными или желтоватыми вязкими жидкостями. Полученные растворы хорошо смачивают поверхность стекла, сапфира, алюминиевой фольги, не собираются в капли при нагревании субстрата и легко подвергаются пиролизу, образуя тонкие и равномерные по толщине пленки оксидов. На рис. 1 представлены результаты термогравиметрического анализа НДК и раствора карбоксилата никеля в НДК. Известно, что НДК представляет собой не индивидуальное соединение, а смесь 2,2,3,5-тетраметилгексановой, 2,4-диметил-2-изопропилпентановой, 2,5-диметил-2-этилгексановой, 2,2-диметилгексановой, 2,2-диэтилгексановой кислот с температурой кипения в пределах 243-254 °С [22].

Компоненты НДК при нагревании удаляются с подложки в интервале температур от 110 °С до 210 °С преимущественно за счет их термического разложения без образования какого-либо сухого остатка (рис. 1а). При нагревании раствора карбоксилата никеля в неодакановой кислоте сначала также происходит удаление растворителя, а затем в интервале температур 275-340 °С протекает пиролиз карбоксилата никеля (рис. 1б). Аналогичные процессы наблюдаются и при нагревании растворов карбоксилатов цинка, железа, хрома, марганца. Во всех случаях для полного разложения карбоксилатов достаточно температуры 350 °С.

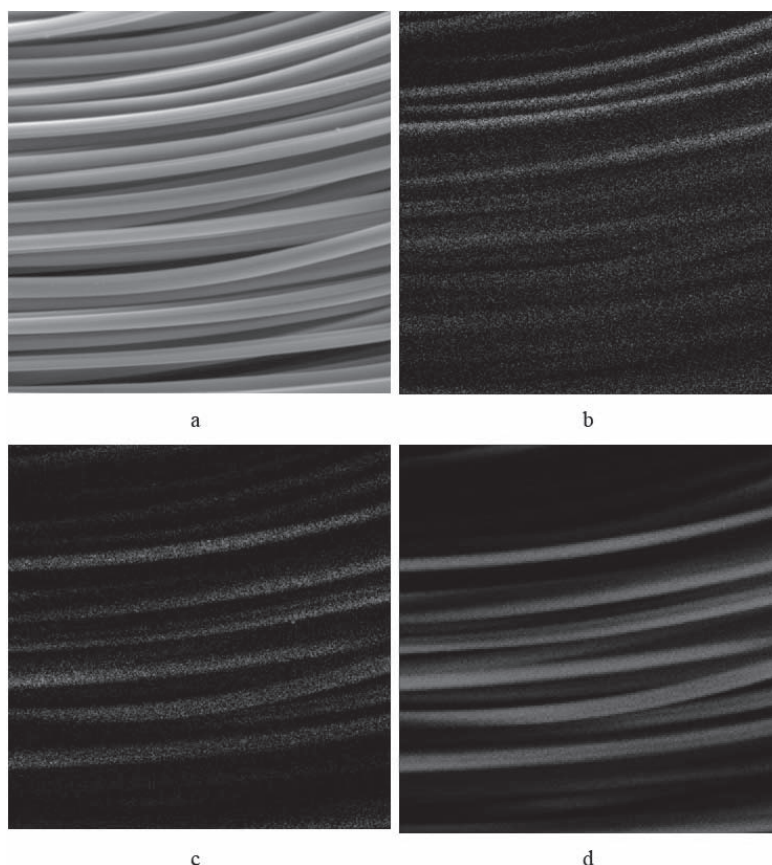
В результате пиролиза растворов карбоксилатов на поверхности всех использованных субстратов образуются тонкие пленки оксидов, равномерно покрывающие поверхность. Так, исследование методом СЭМ поверхности образца алюминиевой фольги, покрытой оксидом никеля, показало отсутствие собственной текстуры покрытия, а также дефектов, пор или трещин (рис. 2а). Картирование элементного состава методом РСМА также демонстрирует высокую равномерность распределение никеля по поверхности образца (рис. 2б).



**Рис. 1.** Термогравиметрические кривые НДК (а) и раствора карбоксилата никеля в НДК (б)  
**Fig. 1.** Thermogravimetric curves of neo-decanoic acid(a) and nickel carboxylate solution in neo-decanoic acid (b)



**Рис. 2.** СЭМ изображение поверхности образца алюминиевой фольги с покрытием оксидом никеля (а) и распределе-  
 ние никеля по поверхности образца (б)  
**Fig. 2.** SEM image of the aluminum foil sample coated with nickel oxide (a) and nickel distribution on the sample surface (b)



**Рис. 3.** СЭМ изображение волокон углеродной ткани «Бусофит-Т» с покрытием оксидом марганца (а); распределение марганца (b), кислорода (c) и углерода (d) по поверхности волокон

**Fig. 3.** SEM image of the carbon fabric "Busofit-T" fibers coated with manganese oxide (a); distribution of manganese (b), oxygen (c), and carbon (d) over the fiber surface

Рентгенофазовый анализ подтвердил формирование на поверхности сапфира пленок оксида железа(III) в форме гематита, оксида хрома(III) в форме эсколаита, оксида никеля(II) в форме бунзенита, оксида цинка гексагональной сингонии типа вюрцита и  $Mn_2O_3$  кубической сингонии. По данным электронномикроскопических исследований, а также по изменению массы подложки можно оценить толщину формируемых оксидных слоев на уровне порядка 10-20 нм.

Нанесение карбоксилата марганца на углеродную ткань «Бусофит-Т» методом окунания и вытягивания из раствора с последующим пиролизом при 350 °С позволило получить тонкий слой оксида марганца с равномерным распределением марганца по поверхности (рис. 3 a-d) без повреждения волокнистой структуры ткани. Перспективно использование полученного материала в качестве электрода СК с повышенными ёмкостями характеристиками за счет включения фарадеевских редокс механизмов в процессы накопления энергии.

### Заключение

Таким образом, предложен и апробирован метод получения металлоксидных покрытий на поверхностях различных субстратов из растворов карбоксилатов соответствующих металлов. Для получения карбоксилатов использовали неодакановую кислоту, молекула которой содержит разветвленный углеродный скелет и четвертичный  $\alpha$ -атом углерода, что позволяет использовать относительно невысокие температуры при пиролизе. Отличительной особенностью метода является формирование практически бездефектных пленок оксидов, не обладающих собственной текстурой и равномерно покрывающих поверхность подложки даже со сложным рельефом, что особенно важно для создания электродных материалов устройств накопления энергии. Другими важными преимуществами предложенного метода являются доступность реагентов, отсутствие необходимости использования вакуумной и другой сложной техники, а также широкие возможности получения допированных и многослойных покрытий с необходимыми функциональными свойствами.

## Литература

1. Giordano L., Pacchioni G. Oxide films at the nanoscale: new structures, new functions, and new materials. *Accounts of chemical research*. 2011. V. 44, № 11. P. 1244-1252. doi:org/10.1021/ar200139y.
2. Olsson C. O., Landolt D. Passive films on stainless steels-chemistry, structure and growth. *Electrochimica acta*. 2003. V. 48, № 9. P. 1093-1104. doi:org/10.1016/S0013-4686(02)00841-1.
3. Храменкова А.В., Изварина Д.Н., Шершакова А.А., Кириленко М.А., Кузнецов О.Ю. Электрохимическое получение гибридных покрытий на основе оксидов кобальта, никеля и хитозана и исследование их функциональных свойств // Гальванотехника и обработка поверхности. 2022. Т. 30, № 3. С. 57 – 67. doi: 10.47188/0869-5326\_2022\_30\_3\_57.
4. Абрашов А.А., Григорян Н.С., Ваграмян Т.А., Костюк А.Г., Василенко О.А. Адгезионные наноразмерные покрытия на основе оксидов титана или циркония // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Том 27, № 3. С.45 – 51. doi: 10.47188/0869-5326\_2019\_27\_3\_45.
5. Гришина Е.П., Кудрякова Н.О., Раменская Л.М.. Применение золь-гель метода для нанесения оксидноалюминиевого покрытия на низколегированную сталь // Гальванотехника и обработка поверхности. 2019. Т. 27, № 2. С.59 – 68. doi: 10.47188/0869-5326\_2019\_27\_2\_56.
6. Wang D., Bierwagen G.P. Sol-gel coatings on metals for corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*. 2009. V. 64, P. 327-338. doi:org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.010.
7. Merkl P., Long S., McInerney G. M., Sotiriou G. A. Antiviral activity of silver, copper oxide and zinc oxide nanoparticle coatings against SARS-CoV-2. *Nanomaterials*. 2021. V. 11, № 5. P. 1312 - 1321. doi:org/10.3390/nano11051312.
8. Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Kaus N. H. M., Ann L. C., Bakhori S. K. M. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-micro letters*. 2015. V. 7, № 3. P. 219 - 242. doi: 10.1007/s40820-015-0040-x.
9. Абызов А. М. Тонкие пленки оксидов титана, хрома, циркония, олова, полученные из раствора // Журнал прикладной химии. 2017. Т. 90, № 7. С. 869 - 876. doi: 10.1134/S1070427217070096
10. Sypniewska M., Szczesny R., Popielarski P., Strzalkowski K., Derkowska-Zielinska B. Structural, morphological and photoluminescent properties of annealed ZnO thin layers obtained by the rapid sol-gel spin-coating method. *Opto-Electronics Review*. 2020. V. 28, № 4. P. 182 - 190. doi:10.24425/opelre.2020.134460.

## References

1. Giordano L., Pacchioni G. Oxide films at the nanoscale: new structures, new functions, and new materials. *Accounts of chemical research*, 2011, vol. 44, no. 11. pp. 1244-1252. doi:org/10.1021/ar200139y.
2. Olsson C. O., Landolt D. Passive films on stainless steels-chemistry, structure and growth. *Electrochimica acta*, 2003, vol. 48, no. 9, pp. 1093-1104. doi:org/10.1016/S0013-4686(02)00841-1.
3. Khramenkova A.V., Izvarina D.N., Shershakova A.A., Kirilenko M.A., Kuznetsov O.Yu. Electrohimicheskoe poluchenie gibridnykh pokrytii na osnove oksidov kobal'ta, nikelia i khitozana i issledovanie ikh funktsional'nykh svoistv [Electrochemical Preparation of Hybrid Coatings Based on Cobalt Nickel Oxides and Chitosan and Investigation of their Functional Properties]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2022, vol. 30, no. 3, pp. 57 – 67. doi: 10.47188/0869-5326\_2022\_30\_3\_57. (in Russian).
4. Abrashov A.A., Grigoryan N.S., Vagramyan T.A., Kostuk A.G., Vasilenko O.A.. Adgezionnyye nanorazmernyye pokrytiya na osnove oksidov titana ili tsirkoniya [Nano-adhesion underlayers for painting based on titanium or zirconium oxides]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 45 – 51. doi: 10.47188/0869-5326\_2019\_27\_3\_45 (in Russian).
5. Grishina E.P., Kudryakova N.O., Ramenskaya L.M.. Primeneniye zol'-gel' metoda dlya naneseniya oksidnoalyuminiyevogo pokrytiya na nizkolegirovannuyu stal' [Application of sol-gel method for the formation of alumina coating on low-alloyed steel]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 59 – 68. doi: 10.47188/0869-5326\_2019\_27\_2\_56.
6. Wang D., Bierwagen G.P. Sol-gel coatings on metals for corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*, 2009, vol. 64, pp. 327-338. doi:org/10.1016/j.porgcoat.2008.08.010.
7. Merkl P., Long S., McInerney G. M., Sotiriou G. A. Antiviral activity of silver, copper oxide and zinc oxide nanoparticle coatings against SARS-CoV-2. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 1312 - 1321. doi:org/10.3390/nano11051312.
8. Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Kaus N. H. M., Ann L. C., Bakhori S. K. M. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-micro letters*, 2015, vol. 7, no 3, pp. 219-242. doi: 10.1007/s40820-015-0040-x.
9. Abyzov A. M. Chemical solution deposited thin films of titanium, chromium, zirconium, and tin oxides. *Russian Journal of Applied Chemistry*,

11. Gupta R., Kumar A., Biswas A., Singh R., Gehlot A., Akram S.V., Verma A.S. Advances in micro and nano-engineered materials for high-value capacitors for miniaturized electronics. *Journal of Energy Storage*. 2022. V. 55, С. 105591-105612. doi:org/10.1016/j.est.2022.105591.
12. Дунюшкина Л. А. Введение в методы получения пленочных электролитов для твердооксидных топливных элементов: монография. Екатеринбург: УрО РАН, 2015. 126 с.
13. Svintsov A. A., Krasnov A. A., Polikarpov M. A., Polyakov A. Y., Yakimov E. B. Betavoltaic battery performance: Comparison of modeling and experiment. *Applied Radiation and Isotopes*. 2018. V. 137. С. 184 - 189. doi:org/10.1016/j.apradiso.2018.04.010.
14. Амелина Д. Е., Астахов М. В., Бутырина С. А., Стаханова С. В. Нанесение многослойных наноструктурных никелевых пленок на кремниевую поверхность пиролитическим методом // Цветные металлы. 2017. № 8. С. 61– 65. doi: 10.17580/tsm.2017.08.09.
15. Simon P., Gogotsi Y. Materials for electrochemical capacitors. *Nature materials*. 2008. V. 7, № 11. P. 845 - 854. doi:org/10.1038/nmat2297.
16. Вольфкович Ю. М. Электрохимические суперконденсаторы (обзор) // Электрохимия. 2021. Т. 57. № 4. С. 197 - 238. doi:10.31857/S0424857021040101.
17. Агликов А.С., Кудряшов Д.А., Можаров А.М., Макаров С.В., Большаков А.Д., Мухин И.С. Особенности магнетронного напыления тонких пленок оксида никеля для применения в составе перовскитных солнечных элементов // Журнал технической физики. 2019. Т. 89, № 3. С. 460–464.
18. Rabinovich L., Lev O. Sol-Gel Derived Composite Ceramic Carbon Electrodes. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*. 2001. V. 13, № 4. P. 265 - 275.
19. Schneller T., Waser R., Kosec M., Payne D. (Eds.). *Chemical solution deposition of functional oxide thin films*, Springer Vienna, Vienna, 2013. 796 p.
20. Холькин А. И., Патрушева Т. Н. Экстракционно-пиролитический метод получения оксидных функциональных материалов // Химическая технология. 2018. Т. 19, № 13. С. 596 – 602. doi: 10.31044/1684-5811-2018-19-13-596-602.
21. Холькин А.И., Патрушева Т.Н. Экстракционно-пиролитический метод получения оксидных функциональных материалов. М.: КомКнига, 2006. 276 с.
- 2017, vol. 90, no. 7, pp. 1082-1088. doi: 10.1134/S1070427217070096.
10. Sypniewska M., Szczesny R., Popielarski P., Strzalkowski K., Derkowska-Zielinska B. Structural, morphological and photoluminescent properties of annealed ZnO thin layers obtained by the rapid sol-gel spin-coating method. *Opto-Electronics Review*, 2020, vol. 28, no 4, pp. 182-190. doi: 10.24425/opelre.2020.134460.
11. Gupta R., Kumar A., Biswas A., Singh R., Gehlot A., Akram S.V., Verma A.S. Advances in micro and nano-engineered materials for high-value capacitors for miniaturized electronics. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 55, pp. 105591 - 105612. doi:org/10.1016/j.est.2022.105591
12. Duniushkina L. A. Vvedeniye v metody polucheniya plenochnykh elektrolitov dlya tverdotsidnykh toplivnykh elementov: monografiya [Introduction to methods for obtaining film electrolytes for solid oxide fuel cells: monograph]. Yekaterinburg, UrO RAN, 2015. 126 p. (in Russian)
13. Svintsov A. A., Krasnov A. A., Polikarpov M. A., Polyakov A. Y., Yakimov E. B. Betavoltaic battery performance: Comparison of modeling and experiment. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, vol. 137, pp. 184 - 189. doi:org/10.1016/j.apradiso.2018.04.010.
14. Amelina D.E., Astakhov M.V., Butyrina S.A., Stakhanova S.V. Naneseniye mnogoslonykh nanostrukturnykh nikelovykh plenok na kremniyevuyu poverkhnost' piroliticheskim metodom [Deposition of multilayer nanostructured nickel films on a silicon surface by the pyrolytic method]. *Tsvetnye metally*, 2017, no. 3, pp. 61 – 65. doi: 10.17580/tsm.2017.08.09. (in Russian).
15. Simon P., Gogotsi Y. Materials for electrochemical capacitors. *Nature materials*, 2008, vol. 7, no 11, pp. 845 - 854. doi: org/10.1038/nmat2297
16. Volfkovich Y.M. Electrochemical supercapacitors (a review). *Russian Journal of Electrochemistry*, 2021, vol. 57, no. 4, pp. 311-347. doi: 10.31857/S0424857021040101.
17. Aglikov A. S., Kudryashov D. A., Mozharov A. M., Makarov S. V., Bolshakov A. D., Mukhin I. S. Peculiarities of Magnetron Sputtering of Nickel Oxide Thin Films for Use in Perovskite Solar Cells. *Technical Physics*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 422-426.
18. Rabinovich L., Lev O. Sol-Gel Derived Composite Ceramic Carbon Electrodes. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, 2001, vol. 13, no 4, pp. 265 - 275.

22. Gotfryd L., Pietek G., Szolomicki Z., Becker K., Piwowońska J. Neodecanoic acid as extractant of selected non-ferrous metals. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2015. V.51, №2, P. 435–445. doi:org/10.5277/ppmp150206.

19. Schneller T., Waser R., Kosec M., Payne D. (Eds.). *Chemical solution deposition of functional oxide thin films*, Springer Vienna, Vienna, 2013. 796 p.

20. Kholkin A.I., Patrusheva T.N. Ekstraktsionno-piroliticheskiy metod polucheniya oksidnykh funktsional'nykh materialov [Extraction-pyrolysis method for production of functional oxide materials]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2018, vol. 19, no. 13, pp. 596 – 602. doi: 10.31044/1684-5811-2018-19-13-596-602. (in Russian).

21. Kholkin A.I., Patrusheva T.N. Ekstraktsionno-piroliticheskiy metod polucheniya oksidnykh funktsional'nykh materialov [Extraction-pyrolytic method for obtaining oxide functional materials]. Moscow, KomKniga, 2006. 276 p. (in Russian)

22. Gotfryd L., Pietek G., Szolomicki Z., Becker K., Piwowońska J. Neodecanoic acid as extractant of selected non-ferrous metals. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 435–445. doi:org/10.5277/ppmp150206.

#### Сведения об авторах

**Стаханова Светлана Владленовна** – к.х.н., доцент  
e-mail: stakhanova.s.v@muctr.ru (автор, ответственный за переписку)

**Свириденкова Наталья Васильевна** – к.х.н., e-mail: sviridenkova.n.v@muctr.ru

**Жуков Александр Федорович** – к.х.н., профессор, e-mail: zhukov.a.f@muctr.ru

**Постников Алексей Алексеевич** – к.т.н., доцент, e-mail: postnikov.a.a@muctr.ru

**Тимчишина Екатерина Игоревна** – студент магистратуры, e-mail: timchishina.e.i@muctr.ru

#### Information about authors

**Stakhanova S.V.** – Ph.D., e-mail: stakhanova.s.v@muctr.ru

**Sviridenkova N.V.** – Ph.D., e-mail: sviridenkova.n.v@muctr.ru

**Zhukov A.F.** – professor, e-mail: zhukov.a.f@muctr.ru

**Postnikov A.A.** – Ph.D., e-mail: postnikov.a.a@muctr.ru

**Timchishina E.I.** – student, e-mail: timchishina.e.i@muctr.ru

#### Для цитирования

С.В. Стаханова, Н.В. Свириденкова, Е.И. Тимчишина, А.А. Постников, А.Ф. Жуков. Формирование функциональных металлооксидных покрытий пиролизом карбоксилатов металлов // Гальванотехника и обработка поверхности. 2022. Т. 30, № 4. С. 29–36.

DOI: 10.47188/0869-5326\_2022\_30\_4\_29

#### For citation

S.V. Stakhanova, N.V. Sviridenkova, E.I. Timchishina, A.A. Postnikov, A.F. Zhukov. Formation of functional metal oxide coatings by metal carboxylates pyrolysis. *Galvanotekhnika I obrabotka poverkhnosti*, 2022, vol. 30, no. 4, pp. 29–36.

DOI: 10.47188/0869-5326\_2022\_30\_4\_29