



**МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ
ЗАЩИТЫ**

**MATERIALS AND EQUIPMENT FOR
CORROSION PROTECTION**

Article type: original

Тип статьи: научная, оригинальная

<https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-2>

**Оценка термического повреждения ткани при использовании
электрохирургического инструмента с износостойкими покрытиями**

**А.К. Евсеев¹✉, Н.А. Поляков², И.Н. Мягкова³, И.В. Горончаровская¹,
И.И. Кирсанов¹, А.Б. Дровосеков², А.А. Каниболоцкий¹, А.А. Саприн¹**

¹Научно-исследовательский институт скорой помощи имени Н.В. Склифосовского
Департамента здравоохранения города Москвы,
РФ, 129090, г. Москва, Большая Сухаревская площадь, 3, стр. 1

²Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН,
РФ, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 31, корп. 4

³Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева,
РФ, 125047, г. Москва, Миусская площадь, д. 9

e-mail: evseevak@sklif.mos.ru

Аннотация. В качестве функциональных покрытий электрохирургического инструмента исследованы покрытия Cr-наноалмаз, WC, а также сплавы Ni-P и Ni-W-P. В модельных экспериментах было показано, что использование покрытий Ni-P (15,6 ат.% P) и Ni-W-P (1,4 ат.% W; 12,6 ат.% P) приводило к снижению глубины термического поражения по сравнению с непокрытым инструментом. Было предположено, что функциональные свойства покрытий зависят от сочетания многих факторов, в том числе микротвердости, шероховатости, электропроводности, однако вклад того или иного фактора требует более тщательного изучения.

Ключевые слова: электрохирургия, сплав Ni-P, сплав Ni-W-P, Cr-наноалмаз, WC

Для цитирования: Евсеев А.К., Поляков Н.А., Мягкова И.Н., Горончаровская И.В., Кирсанов И.И., Дровосеков А.Б., Каниболоцкий А.А., Саприн А.А. Оценка термического повреждения ткани при использовании электрохирургического инструмента с износостойкими покрытиями // Практика противокоррозионной защиты. – 2025. – Т. 30, № 1 – С. 21-29. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-2>

Статья получена 12.11.2024. Принята к публикации 15.02.2025. Опубликовано 01.03.2025.

Конфликт интересов. Поляков Н.А. является членом редакционной коллегии журнала «Практика противокоррозионной защиты» с 2010 г., но не имеет отношения к решению опубликовать данную статью. Статья прошла принятую в журнале процедуру рецензирования. Об иных конфликтах интересов авторы не заявляли.

**Evaluation of Thermal Tissue Damage Using
an Electrosurgical Instrument with Wear-Resistant Coatings**

**Anatoly K. Evseev¹✉, Nikolai A. Polyakov², Inna N. Myagkova³,
Irina V. Goroncharovskaya¹, Iliya I. Kirsanov¹, Andrey B. Drovosekov²,
Alexander A. Kanibolotsky¹, Artem A. Saprin¹**

¹Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine,
bld. 1, 3, B. Sukharevskaya square, Moscow, 129090, Russian Federation

²Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences,
bld. 4, 31, Leninskiy pr., Moscow, 119071, Russian Federation

³Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia,
9, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation

e-mail: evseevak@sklif.mos.ru

Abstract. Cr-nanodiamond, WC, and Ni-P and Ni-W-P alloys were studied as functional coatings for electrosurgical instruments. Model experiments showed that the use of Ni-P (15.6 at.% P) and Ni-W-P (1.4 at.% W; 12.6 at.% P) coatings resulted in a decrease in the depth of thermal damage compared to an uncoated instrument. It was suggested that the functional properties of the coatings depend on a combination of many factors, including microhardness, roughness, and electrical conductivity; however, the contribution of any given factor requires more detailed study.

Keywords: electrosurgery, Ni-P alloy, Ni-W-P alloy, Cr-nanodiamond, WC

For citation: Evseev, A. K., Polyakov, N. A., Myagkova, I. N., Goroncharovskaya, I. V., Kirsanov, I. I., Drovosekov, A. B., Kanibolotsky, A. A. & Saprin, A. A. (2025). Evaluation of Thermal Tissue Damage Using an Electrosurgical Instrument with Wear-Resistant Coatings. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 30(1), 21-29. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2025.115.1-2>

Received November 12, 2024. Accepted for publication February 15, 2025. Published March 01, 2025.

Conflict of interest. Polyakov N.A. has been a member of the editorial board of the journal "Theory and Practice of Corrosion Protection" since 2010, but was not involved in the decision to publish this article. The article passed the journal's peer review procedure. The authors declared no other conflicts of interest.

Введение

В современной оперативной практике одними из наиболее часто применяемых являются электрохирургические методики, основанные на разрушении биологических тканей переменным током высокой частоты (свыше 200 кГц) за счет его преобразования в тепловую энергию и локального разогрева инструмента до температур выше 100 °C [1]. Несмотря на ряд преимуществ электрохирургии (быстрота операции, минимизация оперативного вмешательства, снижение риска развития послеоперационных осложнений), в процессе эксплуатации происходит образование нагара и налипание тканей, что, в свою очередь, приводит к снижению эффективности процесса и влияет на состоятельность гемостаза и глубину термического поражения ткани [2, 3]. Данное обстоятельство требует либо замены инструмента во время операции на новый, либо его очистки с применением абразивных материалов, что, из-за повышения шероховатости, приводит к ухудшению его эксплуатационных характеристик [4].

Одним из подходов к улучшению функциональных свойств электрохирургического инструмента [5] является использование покрытий с величиной микротвердости, превосходящей нержавеющую сталь (как основного материала электродов). Исследования возможности использования покрытий на основе оксидов металлов (Cr_2O_3 , CrO_x , ZrO_x , TiO_2) [6-8], нитридов металлов (CrN , $CrWN_x$, ZrN , TiN) [4, 9] и алмазоподобного углерода [10, 11] показали перспективность развития данной технологии. В боль-

шинстве случаев такие покрытия наносят с применением метода магнетронного распыления, который является весьма дорогостоящим. С экономической точки зрения более выгодным является использование электрохимических технологий для получения функциональных покрытий электрохирургического инструмента с высокими показателями микротвердости и износостойкости. Например, возможно получение химико-каталитических покрытий на основе сплава Ni-P с величиной микротвердости до 10 ГПа [12] и электролитических хромовых покрытий с ультрадисперсным алмазом Cr/C с микротвердостью 16...20 ГПа [13], что значительно превосходит микротвердость материала электрохирургического инструмента (3,7 ГПа [7]). Коррозионно-защитные свойства таких покрытий [14] также могут положительно влиять на эксплуатационные характеристики инструмента.

Целью работы является оценка термического поражения при использовании электрохирургического инструмента с функциональными покрытиями сплавами Ni-P, Ni-W-P, Cr/C и WC.

Материалы и методы

Технология нанесения покрытий

Покрытия наносили на электрохирургические ножи (Shenzhen EMS Life Medical Technology Co., Ltd, КНР).

Осаждение химико-каталитических покрытий Ni-P и Ni-W-P проводили по методике [14]. Покрытия Ni-P получали из раствора химико-каталитического никелирования следующего состава (г/л):

$NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 25; $CH_3COONa \cdot 3H_2O$ – 10; глицин – 15; $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ – 30; $PbCl_2$ – 2 ppm; pH 5,5 ($NaOH$); $t = 90$ °С. Покрытия $Ni-W-P$ осаждали из раствора с глицином и яблочной кислотой в качестве лигандов. Состав раствора (г/л): $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 14; $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ – 8,25...33; глицин – 15; яблочная кислота – 3,38...13,41; $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ – 31,8; $PbCl_2$ – 2 ppm; pH 7,0 ($NaOH$); $t = 90$ °С. Вольфрамат натрия и яблочную кислоту вводили в раствор в виде растворенной в воде эквимольной смеси. 1 литр такой смеси содержал 0,5 М (165 г/л) $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ и 0,5 М (67 г/л) яблочной кислоты. Толщина покрытий составляла 15 мкм.

Перед химико-каталитическим осаждением покрытий $Ni-P$ и $Ni-W-P$ на электрохирургические ножи, последние подвергали предварительной подготовке, состоящей в обезжиривании 96 %-ным этанолом и предварительном электрохимическом никелировании в электролите следующего состава: $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 200 г/л; HCl (35 %-ная) – 200 мл/л; температура 18...25 °С; $i_k = 5$ А/дм²; продолжительность 5 минут (за это время на электрохирургических ножках образовывалось никелевое покрытие толщиной 0,5 мкм). Предварительное никелирование было необходимо для обеспечения прочной адгезии химико-каталитических покрытий к материалу основы (нержавеющая сталь).

Состав сплавов $Ni-P$ и $Ni-W-P$ определяли электронно-зондовым рентгено-спек-

тральным микроанализом на сканирующем электронном микроскопе JSM U3 фирмы “JEOL” (Япония) с энергодисперсионным спектрометром WinEDS фирмы “Eumex” (ФРГ). Соотношение компонентов в полученных покрытиях представлено в табл. 1.

Покрытия хром-наноалмаз наносили электрохимически из концентрированных сульфатно-оксалатных растворов $Cr(III)$, г/л: $KCr(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ – 250, $Na_2C_2O_4$ – 30...40, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ – 100...110, NaF – 20, pH 1,1...1,5, в которые вводили добавку нанодисперсных частиц алмаза детонационного синтеза в количестве 1 г/л. Подготовка растворов-суспензий включала термообработку свежеприготовленных растворов при 90 °С в течение 30 минут и ультразвуковую обработку в течение 15 минут перед электролизом. Нанесение покрытий проводили при температуре раствора-суспензии 40 °С, катодной плотности тока 50 А/дм² и интенсивном перемешивании с помощью магнитной мешалки [13].

Покрытие WC наносили методом химического газофазного осаждения по методике [15].

В качестве контрольного образца использовали электрод без покрытия.

Модельный эксперимент

Оценку эксплуатационных свойств электрохирургического инструмента с покрытиями проводили в модельном экс-

Таблица 1. Элементарный состав покрытий на основе сплава $Ni-P$

Table 1. Elemental composition of coatings based on $Ni-P$ alloy

Покрытие / Coating	Концентрация $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ в растворе, г/л / Concentration of $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$ in solution, g/l	Содержание элементов в покрытиях, ат. % / Content of elements in coatings, at. %		
		<i>Ni</i>	<i>W</i>	<i>P</i>
<i>Ni-P</i>	-	84,4	-	15,6
<i>Ni-W-P</i>	8,25	86,0	1,4	12,6
	16,5	82,6	2,3	15,1
	24,75	84,1	3,3	12,6
	33,0	86,1	3,1	10,8

перименте на образце мышечной ткани бедра крупного рогатого скота. В работе использовали электрохирургический аппарат ARC 350 (BOWA, Германия) в монополярном режиме «Резание» (100 В). Электрохирургическим инструментом осуществляли разрез длиной 5 см. При этом проводили качественную оценку налипания ткани и сопротивления резу.

Гистологическое исследование

Для гистологического исследования из средней части разреза выделяли участок ткани и помещали в фиксирующий раствор (формалин 10% забуференный). Кассеты с образцами тканей помещали в гистопроцессор карусельного типа, где после стандартной процедуры дегидратации и заливки парафином формировали парафиновые блоки. Из подготовленных блоков было изготовлено по 3 продольных серийных среза толщиной 8...10 мкм. Окрашивание депарафинизированных срезов гематоксилин-эозином проводили по стандартной методике. Анализу подвергали отсканированные изображения срезов. Глубину термического поражения оценивали по 5 точкам вдоль зоны разреза.

Статистический анализ

Статистический анализ данных проводили с помощью пакета программы Statistica 10 (StatSoft, США) и MS Excel (Microsoft, США). Описательную статистику количественных признаков представили в виде $M \pm SD$ (среднее $\pm$ стандартное отклонение). Сопоставление исследуемых групп проводили с использованием U -критерия Манна-Уитни. Статистически значимыми считали различия при значениях $p < 0,05$.

Результаты и обсуждение

В ходе проведения модельного эксперимента при оценке качественных характеристик электрохирургического инструмента с покрытиями было отмечено, что покрытия на основе $Ni-P$ обладают меньшей склонностью к налипанию ткани и оказывают меньшее сопротивление резу по сравнению с электродом без покрытия (табл. 2). По удобству применения наилучшим показал себя электрод с покрытием $Ni-P$ (15,6 ат.% P). Электроды с покрытиями $Ni-W-P$, в целом, соответствовали контролю, только для

электрода с покрытием $Ni-W-P$ (3,1 ат.% W ; 10,8 ат.% P) отмечали более сильное налипание ткани по сравнению с электродом без покрытия. Электроды с износостойкими покрытиями Cr/C и WC в свою очередь оказались значительно менее эффективными, поскольку для них было характерно достаточно сильное налипание ткани, что увеличивало сопротивление резу.

При анализе гистологических срезов (рис. 1) во всех случаях наблюдали схожую картину воздействия электрохирургическим инструментом, проявляющуюся тонким поверхностным слоем высушенных клеток (10...20 мкм) и более глубоким распространением термического поражения (до 400 мкм), выражающегося в разрывании пучков мышечных волокон и исчезновении ядер (рис. 2).

Было показано, что данные по глубине термического поражения согласуются с полученными качественными характеристиками электродов (табл. 2). Анализ глубины термического поражения показал, что, по сравнению с электродом без покрытия, наименьшая глубина поражения наблюдалась в случае использования электрода с покрытием $Ni-P$ (15,6 ат.% P) и составляла $134,88 \pm 17,59$ мкм ($p = 0,032$). Более глубокие поражения в диапазоне от $168,26 \pm 14,58$ до $228,72 \pm 16,36$ мкм фиксировали при использовании электродов с покрытиями $Ni-W-P$. При этом, данные для электрода с покрытием $Ni-W-P$ (1,4 ат.% W ; 12,6 ат.% P) были сопоставимы с контролем, $168,26 \pm 14,58$ мкм и $169,76 \pm 13,15$ мкм соответственно. Для электродов с покрытиями Cr/C глубина термического поражения была сопоставима с покрытиями $Ni-W-P$ с содержанием W 3,1...3,3 ат.%. Однако использование ножей с покрытием Cr/C сопровождалось более высоким сопротивлением резу и налипанием ткани. Для электродов с покрытием WC глубина термического поражения более чем в 2 раза превышала результаты, полученные на контрольном образце, кроме того, отмечали значительное сопротивление резу и налипание ткани. Таким образом, данное покрытие характеризовалось наихудшими показателями среди исследованных образцов.

Было показано, что данные по глубине термического поражения согласуются с полученными качественными характеристи-

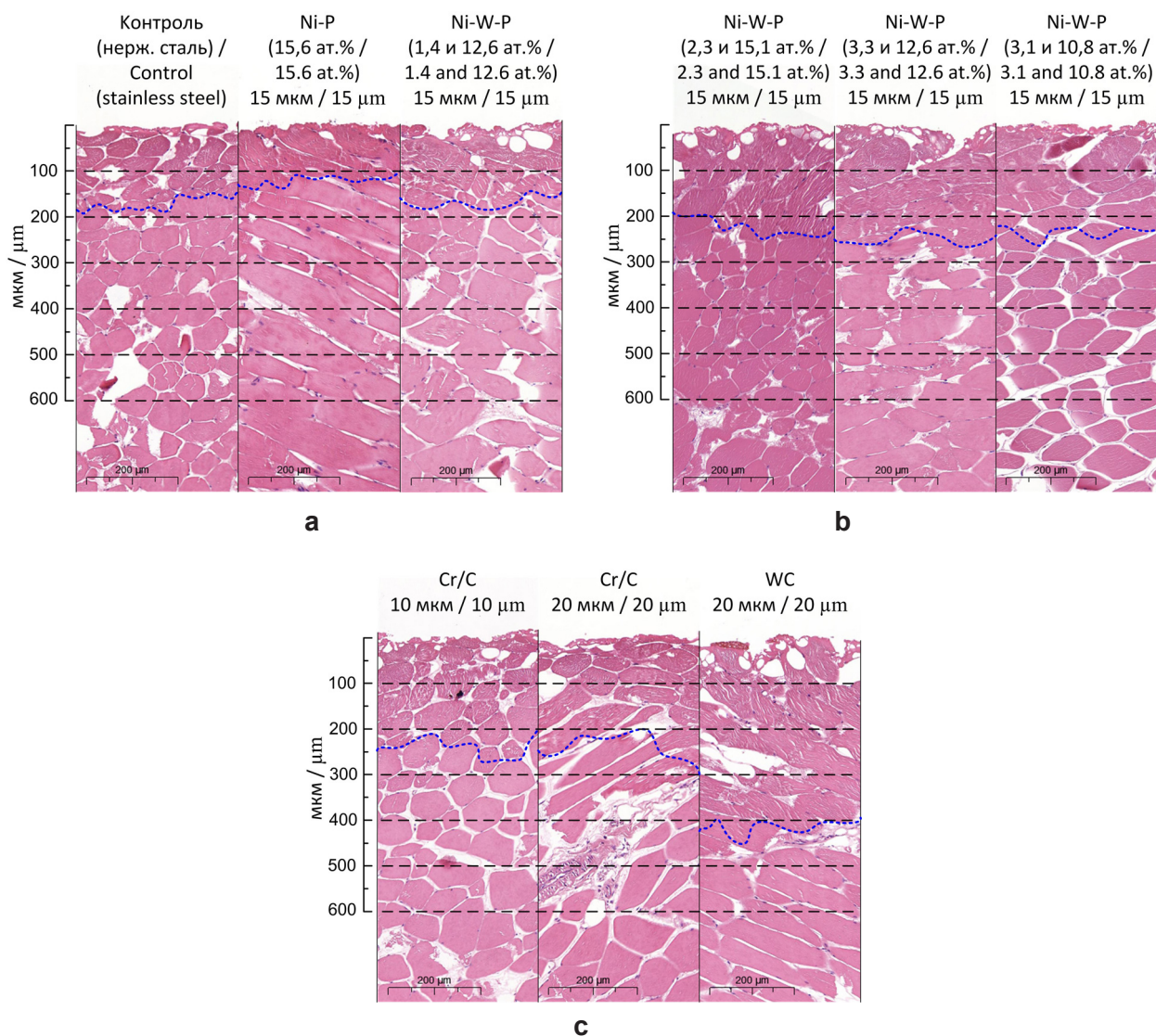


Рис. 1. Микрофотографии гистологических срезов.
Синий пунктир – визуальная граница термического повреждения
Fig. 1. Micrographs of histological sections.
Blue dotted line – visual border of thermal damage

ками электродов (табл. 2). Несмотря на то, что эти результаты носят сугубо субъективный характер, отражающий мнение специалиста, проводящего операцию, они могут служить дополнительным параметром оценки инструмента. Так, в ходе проведения модельного эксперимента было отмечено, что покрытия на основе *Ni-P* обладают меньшей склонностью к налипанию ткани и оказывают меньшее сопротивление резу по сравнению с электродом без покрытия. По удобству применения наилучшим показал себя электрод с покрытием *Ni-P* (15,6 ат.% *P*). Электроды с покрытиями *Ni-W-P*, в целом, соответствовали контрольному образцу, только для электрода

с покрытием *Ni-W-P* (3,1 ат.% *W*; 10,8 ат.% *P*) отмечали более сильное налипание ткани по сравнению с электродом без покрытия. Электроды с износостойкими покрытиями *Cr/C* и *WC* в свою очередь оказались значительно менее эффективными, поскольку для них было характерно достаточно сильное налипание ткани, что увеличивало сопротивление резу.

Обсуждение

Полученные нами данные могут свидетельствовать о сложном характере влияния свойств покрытий на их функциональные характеристики. Так, несмотря на высокое

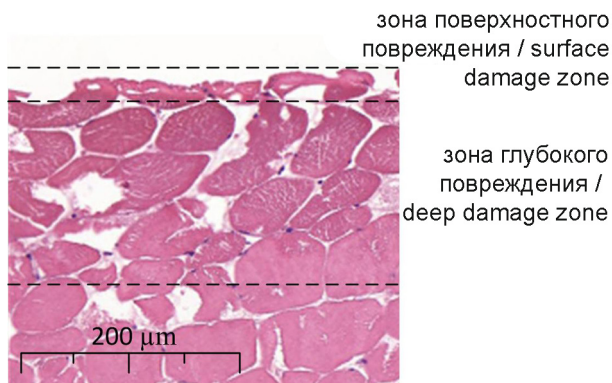


Рис. 2. Микрофотография гистологического среза со схематичным изображением зон повреждения

Fig. 2. Micrograph of a histological section with a schematic representation of the damaged areas

Таблица 2. Характеристики электрохирургического инструмента в модельном эксперименте
Table 2. Characteristics of the electrosurgical instrument in the model experiment

Покрытие / Coating	Налипание ткани / Fabric sticking	Сопротивление резу / Cutting resistance	Глубина термического поражения, мкм / Depth of thermal damage, μm	p-критерий / P-value
Контроль / Control	-	-	169,76±13,15	
Ni-P (15,6 ат.% P)	↓	↓	134,88±17,59	0,032*
Ni-W-P (1,4 ат.% W; 12,6 ат.% P)	—	—	168,26±14,58	1,000
Ni-W-P (2,3 ат.% W; 15,1 ат.% P)	—	—	204,74±15,17	0,016*
Ni-W-P (3,3 ат.% W; 12,6 ат.% P)	—	—	228,72±16,36	0,008*
Ni-W-P (3,1 ат.% W; 10,8 ат.% P)	↑	—	226,62±13,16	0,008*
Cr/C (10 мкм)	↑	↑	229,58±14,72	0,008*
Cr/C (20 мкм)	↑	↑	226,72±17,37	0,008*
WC	↑↑	↑↑	409,38±15,33	0,008*

Примечание. ↓ – ниже по сравнению с контролем, ↑ – выше по сравнению с контролем, — – сопоставимо с контролем. * – различия статистически достоверны ($p < 0,05$)

значение микротвердости покрытия WC по сравнению с покрытиями Ni-P и Ni-W-P [16], оно показало неудовлетворительные результаты в модельных экспериментах, что может быть связано с более низкой электропроводностью [17], по сравнению со сплавами на основе Ni-P [18, 19] и хромом, что приводит к большему разогреву поверхности инструмента и, как следствие, увеличению нагара. Для покрытий на основе Ni-W-P от-

мечено некоторое увеличение глубины термического поражения с ростом содержания W в покрытии. Известно, что увеличение содержания W в сплавах Ni-W-P приводит к повышению их твердости и износостойкости [20], т.е. предполагаемое нами ранее увеличение микротвердости покрытий имеет ограничения, когда излишнее повышение твердости приводит к ухудшению характеристик. Возможно, что данное явление связано с

увеличением шероховатости покрытий при увеличении их твердости и увеличением коэффициента трения. Схожая картина может наблюдаться и в случае композита хром-на-ноалмаз, когда наличие абразивных частиц наноналмаза на поверхности покрытия приводит к повышению шероховатости.

Заключение

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о перспективности применения функциональных покрытий для улучшения характеристик электрохирургического инструмента. Многофакторность влияния свойств покрытия (микротвердость, шероховатость, электропроводность) на конечные рабочие характеристики инструмента открывают обширную область для исследований и подбора покрытий электрохирургического инструмента.

Литература

1. Massarweh N.N., Cosgriff N., Slakey D.P. Electrosurgery: History, Principles, and Current and Future Uses // *Journal of the American College of Surgeons*. – 2006. – V. 202, № 3, – P. 520-530. <https://doi.10.1016/j.jamcollsurg.2005.11.017>
2. Palanker D., Vankov A., Jayaraman P. On mechanisms of interaction in electrosurgery // *New Journal of Physics*. – 2008. – V. 10. Article ID 123022. <https://doi.10.1088/1367-2630/10/12/123022>
3. Zheng L., Wan J., Long Y., Fu H., Zheng J., Zhou Z. Effect of high-frequency electric distributions on the tissue sticking of minimally invasive electrosurgical devices // *Royal Society open science*. – 2018. – V. 5, № 7. – Article ID 180125. <https://doi.10.1098/rsos.180125>
4. Cruz R.L., Nascimento C.D., Souza E.G., Aguzzoli C., Moraes A.C.B.K., Lund R.G. On the Adhesion of Protein in Nitrided Metallic Coatings for Electrosurgical Electrodes of Stainless Steel // *Materials Research*. – 2022. – № 25. – Article ID e20210547. <https://doi.org/10.1557/JMR.1997.0410>
5. Мягкова И.Н., Евсеев А.К., Поляков Н.А., Дровосеков А.Б., Горончаровская И.В., Шабанов А.К. Физико-химические подходы к улучшению характеристик электрохирургического инструмента // *Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология*. – 2022. – Т. 65, № 10. – С. 6-13. <https://doi.10.6060/ivkkt.20226510.6649>
6. Lo J.L., Shieu F.S., Hung C.C. Characterization of textured Cr₂O₃ layer formed on AISI440A stainless steel via anisotropic electropolishing for electrosurgical instruments. // *Material Research Express*. – 2019. – V. 6. – Article 025402. <https://doi.10.1088/2053-1591/aaec5e>
7. Hsu Y.L., Lee C.H., Chiu S.M., Sung Y.C., Yang K.Y., Chu C.W. Anti-sticking Properties of PVD CrWN_x, CrO_x and ZrO_x Coatings on Medical Electrode Application // *Defect and Diffusion Forum*. – 2010. – V. 297, № 301. – P. 656-663. <https://doi.10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.656>
8. Han Z., Fu J., Feng X., Niu S., Zhang J., Ren L. Bionic anti-adhesive electrode coupled with maize leaf microstructures and TiO₂ coating // *RSC Advances*. – 2017. – V. 7, № 72. – P. 45287-45293. <https://doi.10.1039/C7RA08184G>
9. Ou K.L., Chu J.C., Hosseinkhani H., Chiou J.F., Yu C.H. Biomedical nanostructured coating for minimally invasive surgery devices applications: characterization, cell cytotoxicity evaluation and an animal study in rat // *Surgical Endoscopy*. – 2014. – V. 28, № 7. – P. 2174-2188. <https://doi.10.1007/s00464-014-3450-9>
10. Konesky G. Porosity Evolution in Electrosurgical Blade Coatings. // *MRS Online Proceedings Library*. – 1998. – V. 550. – P. 249-254. <https://doi.10.1557/PROC-550-249>
11. Shen Y.D., Lin L.H., Chiang H.J., Ou K.L., Cheng H.Y. Research of electrosurgical unit with novel antiadhesion composite thin film for tumor ablation: Microstructural characteristics, thermal conduction properties, and biological behaviors // *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials*. – 2016. – V. 104, № 1. – P. 96-105. <https://doi.10.1002/jbm.b.33363>
12. Винокуров Е.Г., Бурухина Т.Ф., Скопинцев В.Д., Васильев В.В., Графушин Р.В. Обзор и анализ разработок и исследований трибологических характеристик покрытий Ni-P как альтернатива хромовым покрытиям // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2023. – Т. 31, № 1. – С.19-35. https://doi.10.47188/0869-53262023_31_1_19
13. Polyakov N.A. Formation of chromium composite electrochemical coatings from sulfate oxalate solutions based on Cr(III) // *Russian Journal of Electrochemistry*. – 2016.

– V. 52, № 9. – P. 858-872. <https://doi.org/10.1134/S1023193516090081>

14. Дровосеков А.Б. Сравнение коррозионно-защитных свойств химикокаталитических покрытий Ni-P и Ni-W-P // Практика Противокоррозионной Защиты. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 66-71. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-8>

15. Dushik V.V., Ruban E.A., Shaporenkov A.A., Drovosekov A.B., Rozhanskii N.V., Gladkikh N.A. Mechanical Properties and Corrosion–Electrochemical Behavior of Multilayer Coatings of the Ni–P and W–C System Obtained by the Electroless Plating Method and Chemical Vapor Deposition. Part 1. Structure and Mechanical Properties of Coatings // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. – 2022. – V. 58, № 7. – P. 1301-1306. <https://doi.org/10.1134/S207020512207004>

16. Dushik V.V., Ruban E.A., Drovosekov A.B., Shaporenkov A.A., Rozhanskiy N.V. Synergistic Effect in Ni–P–W and W–C Multilayer Coating Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical-Vapor Deposition // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques – 2023. – V. 17. – P. 1367-1371. <https://doi.org/10.1134/S1027451023060265>

17. Taylor K.A. Ancillary properties of vapor-deposited carbide coatings // Thin Solid Films. – 1977. – V. 40. – P. 201-209. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(77\)90119-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(77)90119-5)

18. Jensen J.A.D., Møller P., Bruton T., Mason N., Russell R., Hadley J., Verhoeven P., Matthewson A. Electrochemical Deposition of Buried Contacts in High-Efficiency Crystalline Silicon Photovoltaic Cells // Journal of The Electrochemical Society. – 2003. – V. 150, № 1. – G49-G57. <https://doi.org/10.1149/1.1528943>

19. Weil R., Parker K. The Properties of Electroless Nickel // In: Electroless Plating: Fundamentals and Applications (Eds. Mallory G.O., Hajdu J.B.). – NY: William Andrew, 1990. – P. 111-137.

20. Palaniappa M., Seshadri S.K. Friction and wear behavior of electroless Ni–P and Ni–W–P alloy coatings // Wear. – 2008. – V. 265. – P. 735-740. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.002>

References

1. Massarweh, N. N., Cosgriff, N. & Slakey,

D. P. (2006). Electrosurgery: History, Principles, and Current and Future Uses. *Journal of the American College of Surgeons*, 202(3), 520-530. <https://doi.org/10.1016/j.jamcollsurg.2005.11.017>

2. Palanker, D., Vankov, A. & Jayaraman, P. (2008). On mechanisms of interaction in electrosurgery. *New Journal of Physics*, 10. Article ID 123022. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/10/12/123022>

3. Zheng, L., Wan, J., Long, Y., Fu, H., Zheng, J. & Zhou, Z. (2018). Effect of high-frequency electric distributions on the tissue sticking of minimally invasive electrosurgical devices. *Royal Society open science*, 5(7). Article ID 180125. <https://doi.org/10.1098/rsos.180125>

4. Cruz, R. L., Nascimento, C. D., Souza, E. G., Aguzzoli, C., Moraes, A. C. B. K. & Lund, R. G. (2022). On the Adhesion of Protein in Nitrided Metallic Coatings for Electrosurgical Electrodes of Stainless Steel. *Materials Research*, (25). Article ID e20210547. <https://doi.org/10.1557/JMR.1997.0410>

5. Myagkova, I. N., Evseev, A. K., Polyakov, N. A., Drovosekov, A. B., Goroncharovskaya, I. V. & Shabanov, A. K. (2022). Physico-chemical approaches to improve the characteristics of electrosurgical instruments. *Chem-ChemTech*, 65(10), 6-13. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20226510.6649> (in Russ.)

6. Lo, J. L., Shieu, F. S. & Hung, C. C. (2019). Characterization of textured Cr₂O₃ layer formed on AISI440A stainless steel via anisotropic electropolishing for electrosurgical instruments. *Material Research Express*, 6. Article 025402. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aaec5e>

7. Hsu, Y. L., Lee, C. H., Chiu, S. M., Sung, Y. C., Yang, K. Y. & Chu, C. W. (2010). Anti-sticking Properties of PVD CrW_N, CrO_x and ZrO_x Coatings on Medical Electrode Application. Defect and Diffusion Forum, 297(301), 656-663. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.297-301.656>

8. Han, Z., Fu, J., Feng, X., Niu, S., Zhang, J. & Ren, L. (2017). Bionic anti-adhesive electrode coupled with maize leaf microstructures and TiO₂ coating. *RSC Advances*, 7(72), 45287-45293. <https://doi.org/10.1039/C7RA08184G>

9. Ou K. L., Chu J. C., Hosseinkhani H., Chiou J. F. & Yu C. H. (2014). Biomedical nanostructured coating for minimally invasive surgery devices applications: characterization, cell cytotoxicity evaluation and an animal study

in rat. *Surgical Endoscopy*, 28(7), 2174-2188. <https://doi.org/10.1007/s00464-014-3450-9>

10. Konesky, G. (1998). Porosity Evolution in Electrosurgical Blade Coatings. *MRS Online Proceedings Library*, 550, 249-254. <https://doi.org/10.1557/PROC-550-249>

11. Shen, Y. D., Lin, L. H., Chiang, H. J., Ou, K. L. & Cheng, H. Y. (2016). Research of electrosurgical unit with novel antiadhesion composite thin film for tumor ablation: Microstructural characteristics, thermal conduction properties, and biological behaviors. *Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials*, 104(1), 96-105. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33363>

12. Vinokurov, E. G., Burukhina, T. F., Skopintsev, V. D., Vasiliev, V. V. & Grafushin, R. V. (2023). Review and analysis of developments and studies of tribological characteristics of Ni-P coatings as an alternative to chromium coatings. *Galvanotechnics and surface treatment*, 31(1), 19-35. https://doi.org/10.47188/0869-53262023_31_1_19 (in Russ.)

13. Polyakov, N. A. (2016). Formation of chromium composite electrochemical coatings from sulfate oxalate solutions based on Cr(III). *Russian Journal of Electrochemistry*, 52(9), 858-872. <https://doi.org/10.1134/S1023193516090081>

14. Drovosekov, A. B. (2020). Comparison of corrosion-protective properties of chemical-catalytic coatings Ni-P and Ni-W-P. *Practice of Anti-Corrosion Protection*, 25(2), 66-71. <https://doi.org/10.31615/j.corros.prot.2020.96.2-8> (in Russ.)

15. Dushik, V. V., Ruban, E. A., Shaporenkov, A. A., Drovosekov, A. B., Rozhanskii, N. V. & Gladkikh, N. A. (2022). Mechanical Proper-

ties and Corrosion-Electrochemical Behavior of Multilayer Coatings of the Ni-P and W-C System Obtained by the Electroless Plating Method and Chemical Vapor Deposition. Part 1. Structure and Mechanical Properties of Coatings. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 58(7), 1301-1306. <https://doi.org/10.1134/S207020512207004>

16. Dushik, V. V., Ruban, E. A., Drovosekov, A. B., Shaporenkov, A. A. & Rozhanskii, N. V. (2023). Synergetic Effect in Ni-P-W and W-C Multilayer Coating Systems Obtained by Chemical-Catalytic Metallization and Chemical-Vapor Deposition. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 17, 1367-1371. <https://doi.org/10.1134/S1027451023060265>

17. Taylor, K. A. (1977). Ancillary properties of vapor-deposited carbide coatings. *Thin Solid Films*, 40, 201-209. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(77\)90119-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(77)90119-5)

18. Jensen, J. A. D., Møller, P., Bruton, T., Mason, N., Russell, R., Hadley, J., Verhoeven, P., & Matthewson, A. (2003). Electrochemical Deposition of Buried Contacts in High-Efficiency Crystalline Silicon Photovoltaic Cells. *Journal of The Electrochemical Society*, 150(1), G49-G57. <https://doi.org/10.1149/1.1528943>

19. Weil, R., Parker, K. (1990). The Properties of Electroless Nickel/ In: *Electroless Plating: Fundamentals and Applications* (Eds. Mallory G.O., Hajdu J.B.). NY: William Andrew, 111-137.

20. Palaniappa, M., Seshadri S.K. (2008). Friction and wear behavior of electroless Ni-P and Ni-W-P alloy coatings. *Wear*, 265, 735-740. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.002>

Информация об авторах

Евсеев Анатолий Константинович, д.х.н., в.н.с., Научно-исследовательский институт скорой помощи имени Н.В. Склифосовского Департамента здравоохранения города Москвы (НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ), г. Москва, Российская Федерация

Поляков Николай Анатольевич, к.х.н., заведующий лабораторией, Институт физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН), г. Москва, Российская Федерация

Мягкова Инна Николаевна, аспирант, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

Горончаровская Ирина Викторовна, к.х.н., с.н.с., НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Кирсанов Илья Игоревич, к.м.н., заведующий отделением, НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Дровосек Андрей Борисович, к.х.н., с.н.с., ИФХЭ РАН, г. Москва, Российская Федерация

Каниболоцкий Александр Алексеевич, к.м.н., заведующий отделением, НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Саприн Артем Анатольевич, заместитель главного врача по медицинской части, НИИ СП имени Н.В. Склифосовского ДЗМ, г. Москва, Российская Федерация

Information about authors

Anatoly K. Evseev, Doctor Sci. in Chemistry, Leading Researcher, N.V. Sklifosovsky Research Institute for Emergency Medicine (Sklifosovsky Institute), Moscow, Russian Federation

Nikolai A. Polyakov, Cand. Sci. in Chemistry, Head of Laboratory, Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences (IPCE RAS), Moscow, Russian Federation

Inna N. Myagkova, Postgraduate, Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

Irina V. Goroncharovskaya, Cand. Sci. in Chemistry, Senior Researcher, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation

Iliya I. Kirsanov, Cand. Sci. in Medicine, Head of Department, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation

Andrey B. Drovosekov, Cand. Sci. in Chemistry, Senior Researcher, IPCE RAS, Moscow, Russian Federation

Alexander A. Kanibolotskiy, Cand. Sci. in Medicine, Head of Department, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation

Artem A. Saprin, Deputy Chief Physician for Medical Affairs, Sklifosovsky Institute, Moscow, Russian Federation