

Научная статья

УДК 620-419.8:621

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31210>



*А.В. Красиков* ✉, *М.В. Меркулова*, *М.В. Старицын*

НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [Krasikov.av@mail.ru](mailto:Krasikov.av@mail.ru)

## **СВОЙСТВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ Ni-P-W**

*Аннотация.* Проведено исследование электроосаждения покрытий системы Ni-P-W из пирофосфатного и цитратного электролитов. Показано, что для активного включения вольфрама в покрытие целесообразно использовать цитратный электролит с температурой 70°C, что позволяет получать покрытия, содержащие 11,5% P и 5% W без микротрещин. Термообработка покрытия данного химического состава при 350°C приводит к увеличению микротвердости до значения 10,1 ГПа, что соответствует твердому хромированию. При этом происходит образование нанокристаллической структуры, состоящей из фаз Ni<sub>3</sub>P и Ni<sub>5</sub>P<sub>2</sub>, и твердого раствора на основе никеля. За счет взаимной диффузии основного металла и покрытия при отжиге повышается адгезия покрытия как на углеродистых, так и на нержавеющей стали. Экспозиция стальных образцов с покрытием Ni-P-W в 3,5% NaCl показала, что покрытие обладает высокой коррозионной стойкостью. В целом уровень свойств покрытия Ni-P-W соответствует твердому гальваническому хрому, но не имеет микротрещин.

*Ключевые слова:* гальванические покрытия, покрытие Ni-P-W, термообработка покрытий, цитратный электролит, эксплуатационные свойства.

*Для цитирования:*

Красиков А.В., Меркулова М.В., Старицын М.В. Свойства и технологические особенности электроосаждения покрытий Ni-P-W // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 2. С. 125–135.  
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31210>



A.V. Krasikov ✉, M.V. Merkulova, M.V. Staritsyn

NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”,  
St. Petersburg, Russia

✉ Krasikov.av@mail.ru

## PROPERTIES OF NI-P-W COATINGS AND TECHNOLOGICAL FEATURES OF THEIR ELECTRODEPOSITION

**Abstract.** A study of the electrodeposition of Ni-P-W coatings from pyrophosphate and citrate electrolytes was conducted. It was shown that for active inclusion of tungsten in the coating, it is advisable to use a citrate electrolyte with a temperature of 70°C, which allows obtaining coatings containing 11.5% P and 5% W without microcracks. Heat treatment of the coating of this chemical composition at 350°C leads to an increase in microhardness to a value of 10.1 GPa, which corresponds to hard chromium plating. In this case, a nanocrystalline structure is formed, consisting of the Ni<sub>3</sub>P and Ni<sub>5</sub>P<sub>2</sub> phases, and a nickel-based solid solution. Due to the mutual diffusion of the base metal and the coating during annealing, the adhesion of the coating increases on both carbon and stainless steels. Exposure of steel samples with a Ni-P-W coating to 3.5% NaCl showed that the coating has high corrosion resistance. In general, the level of properties of the Ni-P-W coating corresponds to hard galvanic chromium, but does not have microcracks.

**Keywords:** galvanic coatings, Ni-P-W coating, heat treatment of coatings, citrate electrolyte, performance properties.

### Citation:

Krasikov A.V., Merkulova M.V., Staritsyn M.V., Properties of Ni-P-W coatings and technological features of their electrodeposition, *Global Energy*, 31 (02) (2025) 125–135, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31210>

**Введение.** Одним из направлений развития гальванических покрытий является разработка альтернативы шестивалентному хромированию. Ключевой проблемой является достижение высокой микротвердости, характерной для покрытий типа «хром твердый», достигающей 10 ГПа (ОСТ5 Р.9048) при обеспечении коррозионной стойкости «молочного» хрома. Альтернативой хромовым покрытиям может служить покрытие на основе системы Ni-P, однако высококачественные покрытия никель-фосфор получают дорогостоящим методом химического осаждения, скорость роста покрытий при этом мала, и электролит фактически является одноразовым.

Более технологичным и экономически целесообразным является электрохимический метод нанесения покрытий Ni-P, однако беспористые покрытия содержат не более 10–11 масс. % P [1]. Такие покрытия имеют невысокую микротвердость, и даже после термообработки, которая приводит к кристаллизации соединений Ni<sub>3</sub>P, этот параметр не превышает 7,7 ГПа [2]. Это значение не удовлетворяет современным требованиям, предъявляемым к твердым хромовым покрытиям. Для улучшения покрытий Ni-P целесообразно применять легирование их вольфрамом [2], что существенно улучшает их микротвердость за счет твердорастворного упрочнения.

В настоящее время система Ni-P-W рассматривается как база для построения композиционных [3, 4] и многослойных покрытий [5, 6]. Перспективными для получения тройных покрытий Ni-P-W являются пирофосфатный и цитратный электролиты. Первый тип обладает высокой рассеивающей способностью [7], второй способствует высокому уровню содержания вольфрама в покрытиях [8, 9]. Тем не менее, как показано в [10], осаждение тройных покрытий Ni-P-W имеет свои особенности, связанные с ингибированием восстановления вольфрама атомами

фосфора, и для разработки технологии получения Ni-P-W покрытий необходимо исследование влияния технологических параметров на их состав и свойства.

Целью работы было исследование процесса получения покрытий Ni-P-W из пирофосфатного и цитратного электролитов и обеспечение микротвердости не ниже 10 ГПа.

### Методика эксперимента

Для эксперимента использовали пирофосфатный и цитратный электролиты. Состав пирофосфатного электролита выбран на основе предложенного ранее состава для электроосаждения покрытий бинарного сплава Ni-W, в который на основании результатов исследований электроосаждения сплава Ni-P [1] введено 0,10 моль/л  $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ . Состав электролита приведен в табл. 1. Покрытие наносили при pH 9,5, оптимальном для электроосаждения сплавов Ni-W из пирофосфатного электролита [11], и температуре 50°C. При осаждении бинарного сплава в данных условиях формируются покрытия, содержащие 28–30% W. Цитратный электролит содержал сульфат никеля 0,06 моль/л, цитрат натрия – 0,5 моль/л и гипофосфит натрия – 0,05 моль/л, pH – 8,0.

Таблица 1

Состав электролита для осаждения сплава Ni-P-W

Table 1

Composition of electrolyte for Ni-P-W alloy deposition

Компонент	Концентрации компонентов, моль/л	
	Пирофосфатный электролит	Цитратный электролит
$\text{NiSO}_4$	0,20	0,06
$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	–	0,360–0,535
$\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$	0,60	–
$\text{Na}_2\text{WO}_4$	0,20	0–0,175
$\text{NH}_4\text{Cl}$	–	0,50
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0,15	–
$\text{NaH}_2\text{PO}_2$	0,05–0,10	0,05
pH	9,5	8,0

Массовую долю фосфора определяли с помощью рентгеноспектрального микроанализа, реализованного на базе растрового электронного микроскопа Tescan Vega II. Исследования фазового состава проводили на бедных образцах с исследуемым покрытием с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV. Измерения проводили с шагом угла  $2\theta$  0,05° при времени выдержки 2 с. Обработку дифракционных линий проводили с помощью программного обеспечения Eva Evolution. Микротвердость покрытий определяли по Виккерсу с помощью микротвердомера ПМТ-3 по ГОСТ 9450. Контроль пористости покрытий проводили по ГОСТ 9.302 методом наложения фильтровальной бумаги. Коррозионные испытания проводили методом погружения образцов покрытий в раствор 3,5% NaCl с периодической фиксацией массы образцов.

### Результаты и обсуждение

Первые эксперименты по осаждению покрытий Ni-P-W проводили в пирофосфатном электролите, выбранном на основе электролита для получения покрытия Ni-30 масс. % W. По сравнению с электроосаждением сплава никель-вольфрам при осаждении сплава тройной системы

введение 0,10 моль/л гипофосфита натрия приводит к резкому снижению содержания вольфрама в покрытии (рис. 1). При уменьшении концентрации  $\text{NaH}_2\text{PO}_2$  вдвое содержание вольфрама увеличивается незначительно, и, несмотря на явное преобладание концентрации вольфрамата над гипофосфитом, происходит преимущественное восстановление фосфора. Такое поведение объясняется конкурирующей адсорбцией электроактивных фосфор- и вольфрамсодержащих частиц.

Селективность никеля по отношению к восстановлению фосфора и подавление реакции восстановления вольфрамата в присутствии гипофосфита в электролите объяснены с позиций механизма восстановления вольфрама, опубликованного в [12]. В предложенной гипотезе вольфрамат может восстанавливаться не на любом участке поверхности электрода, а на свежесформированных частицах (кластерах) никеля или сплава. Соответственно, если таковые частицы ингибированы продуктом восстановления гипофосфит-ионов, восстановление вольфрама существенно затруднено, и, как результат, его содержание в покрытии значительно ниже, чем могло бы быть в отсутствие гипофосфит-ионов.

Известно, что повысить содержание вольфрама в бинарной системе Ni-W возможно за счет увеличения рабочей температуры электролита до 60–75°C [8, 13, 14]. Однако такое повышение температуры приведет к гидролизу дифосфата, в результате чего электролит выйдет из строя. Это делает невозможным решить задачу по обогащению тройного сплава вольфрамом в пиррофосфатном электролите. Поэтому дальнейшие работы проводились с электролитом на основе цитратных комплексов никеля и вольфрама.

В литературе часто отмечается эффективность использования электролита Ni-W, разработанного командой Т. Ямасаки [13, 14] в качестве базы для получения тройных сплавов Ni-P-W. В текущем эксперименте электролит содержал сульфат никеля 0,06 моль/л, цитрат натрия – 0,360–0,535 моль/л и гипофосфит натрия – 0,05 моль/л, рН – 8,0. Для определения концентрации вольфрама, при которой фосфор перестанет подавлять его восстановление, было оценено влияние концентрации вольфрамата натрия в электролите на содержание вольфрама в покрытии. Одновременно с увеличением концентрации ионов вольфрама повышали концентрацию цитрат-ионов. При рН 8,0 один ион вольфрама связывается в комплекс с одним цитрат-ионом [15], поэтому концентрация цитрата, не связанного с никелем или вольфрамом, оставалась постоянной для всей серии опытов.

Введение вольфрамата натрия при комнатной температуре практически не дает эффекта: вольфрам в покрытие включается лишь в незначительном количестве (рис. 2). Повышение температуры до 50°C, вопреки ожиданиям, не позволило осадить покрытия с заметным содержанием вольфрама. Его количество в сплаве, независимо от концентрации вольфрамата в электролите, не превышало 1 масс. %, что даже ниже, чем при осаждении из пиррофосфатного электролита. Опираясь на вывод, сделанный в предыдущем разделе, температуру электролита довели до 70°C. Действительно, при 70°C удалось получить сплав с 5 масс. % тугоплавкого компонента. По характеру кривых на рис. 2 можно косвенно судить, что при температуре 70°C фосфор уже не так активно подавляет восстановление вольфрама. Содержание вольфрама в сплаве хоть и становится более чувствительным к концентрации вольфрамата, но все же выходит на насыщение, и его содержание намного ниже 45 масс. %, которое получено в [14] при осаждении из такого же по составу электролита без гипофосфита. Это говорит о том, что хоть температура и ускоряет восстановление вольфрама в данной системе, но все же фосфор продолжает ингибировать этот процесс.

С увеличением плотности тока содержание фосфора сначала снижается, но после достижения 5 А/дм<sup>2</sup> стабилизируется и далее не изменяется (рис. 3а). Повышение температуры электролита хотя и значительно повысило содержания вольфрама (рис. 3б), лишь немного снизило содержание фосфора.

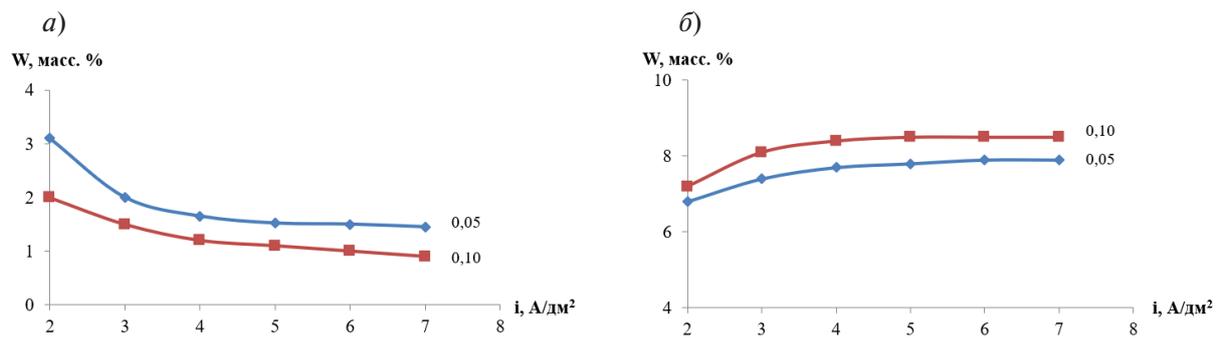


Рис. 1. Зависимость содержания вольфрама (а) и фосфора (б) в покрытии Ni-P-W от плотности тока для электролитов с концентрацией гипофосфита натрия, моль/л

Fig. 1. Dependence of the content of tungsten (a) and phosphorus (b) in the Ni-P-W coating on the current density for electrolytes with a concentration of sodium hypophosphite, mol/l

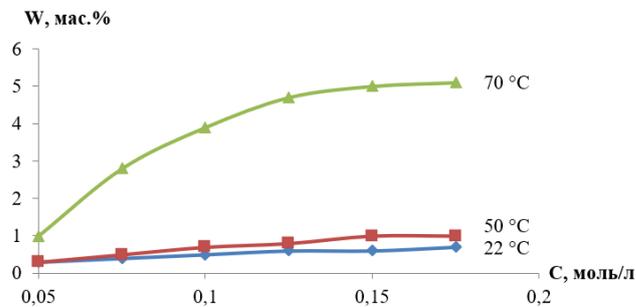


Рис. 2. Влияние концентрации вольфрамата натрия в электролите на содержание вольфрама в сплаве Ni-P-W при плотности тока 5 А/дм² и различных температурах

Fig. 2. Effect of sodium tungstate concentration in the electrolyte on the tungsten content in the Ni-P-W alloy at a current density of 5 A/dm² and different temperatures

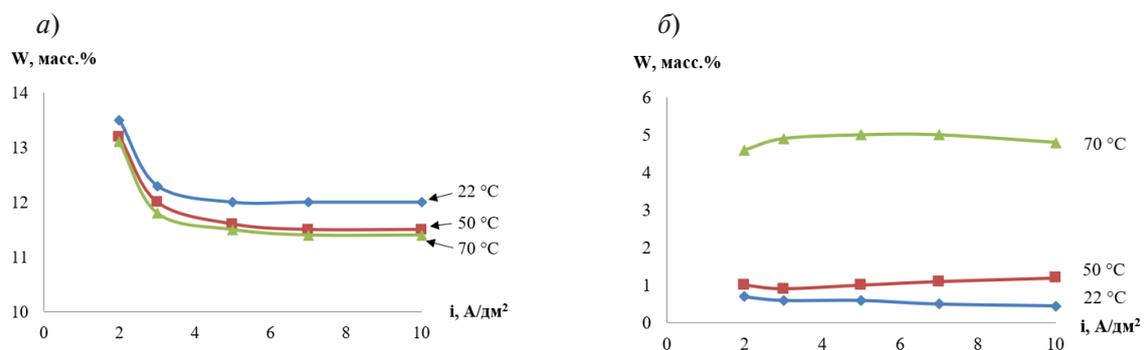


Рис. 3. Влияние плотности тока и температуры электролита на химический состав покрытия: содержание фосфора (а); содержание вольфрама (б)

Fig. 3. Effect of current density and electrolyte temperature on the chemical composition of the coating: phosphorus content (a); tungsten content (b)

Эффективное включение вольфрама в покрытие осуществляется только при  $70^{\circ}\text{C}$ , и скорость восстановления вольфрамата зависит преимущественно от его концентрации (рис. 2) и температуры, что косвенно говорит о возможности наложении химического восстановления никеля и вольфрама.

Слабая зависимость содержания вольфрама от плотности тока в цитратном электролите объясняется ингибированием восстановления вольфрама продуктами восстановления фосфора (атомарный фосфор). Существенная разница по содержанию фосфора в сплавах, осажденных при комнатной температуре и  $50^{\circ}\text{C}$ , говорит об ослаблении адсорбции продуктов восстановления гипофосфита, которое, тем не менее, не приводит к значительным изменениям в содержании вольфрама. То есть помимо конкурирующей адсорбции на восстановление вольфрама действует еще ряд параметров. Наиболее весомым представляется изменение энергии активации процесса восстановления вольфрамат-иона, в особенности с учетом того, что при восстановлении сплава Ni-W из цитратного электролита температура оказывает значительное влияние на состав сплава [8].

Существует мнение, что электрохимически осажденные покрытия на основе системы Ni-P имеют несплошности в виде пор и микротрещин. Однако детальное исследование структуры поверхности покрытий, испытание на пористость по ГОСТ 9.302 методом наложения фильтровальной бумаги опровергают это мнение. Разработанные покрытия Ni-P-W осаждаются сплошные, не имеют пор или трещин (рис. 4).

Исходя из полученных зависимостей оптимальным режимом нанесения покрытия являются диапазон плотностей тока  $4\text{--}7\text{ А/дм}^2$  и температура электролита  $70^{\circ}\text{C}$ . При этих условиях осаждается покрытие, содержащее 11,5% P и 5% W. Неизменность химического состава, в широком интервале плотности тока, позволяет использовать данный электролит и режим нанесения покрытия на изделия сложной геометрии. Данные технологические условия были использованы для изготовления образцов для исследования процессов формирования композиционного покрытия.

После термообработки в течение одного часа при  $350^{\circ}\text{C}$  пресыщенный твердый раствор разлагается с образованием наноразмерной фазы  $\text{Ni}_3\text{P}$ , твердого раствора на основе никеля, содержащего фосфор и, предположительно, вольфрам, а также третью фазу, которая представлена лишь одним независимым максимумом (рис. 5). Рассчитанный средний размер ОКР для каждой из имеющихся фаз равен примерно 22 нм. Третья фаза, вероятно, является соединением  $\text{Ni}_5\text{P}_2$ , которое, впрочем, неравновесно при данной концентрации фосфора в покрытии. Термодинамически оно должно образовываться при  $\sim 25\text{ ат. \%}$ , что позволяет сделать вывод о наличии флуктуаций химического состава в объеме покрытия. Также характер дифрактограммы позволяет предположить наличие некоторого количества аморфной фазы.

Изначально микротвердость покрытия составляет 6,1 ГПа. После часовой термообработки при  $350^{\circ}\text{C}$  она значительно возрастает, превышая значение микротвердости, полученной в системе Ni-P при тех же условиях (7,7 ГПа), и составляет 8,8 ГПа. Термообработка в течение 2 ч при той же температуре повышает микротвердость покрытия до 10,1 ГПа, что соответствует уровню микротвердости твердых хромовых покрытий.

В процессе термической обработки помимо кристаллизации фосфидов никеля происходит диффузия компонентов основного металла в покрытие и наоборот. На рис. 6 приведены результаты исследования химического состава покрытия Ni-P-W и стального образца после отжига при  $350^{\circ}\text{C}$  в течение 6 ч. Точечные участки сбора информации об элементном составе обозначены перекрестиями в левых верхних углах подписей спектров 1–6 и в правых верхних углах подписей спектров 7–8. Зона эмиссии характеристического рентгеновского излучения каждого точечного участка зависит от материала аналитической поверхности и имеет диаметр не менее 1 мкм. Все точечные участки лежат на одной прямой, пересекающей покрытие и расположенной таким образом, чтобы точечные зоны анализа не перекрывались друг другом.

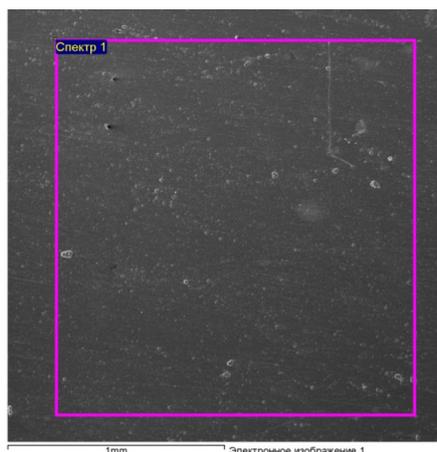


Рис. 4. Электронное изображение поверхности покрытия Ni-P-W. Прямоугольной рамкой выделен участок сбора информации об элементном составе покрытия

Fig. 4. Electronic image of the Ni-P-W coating surface. The rectangular frame highlights the area where information about the elemental composition of the coating is collected

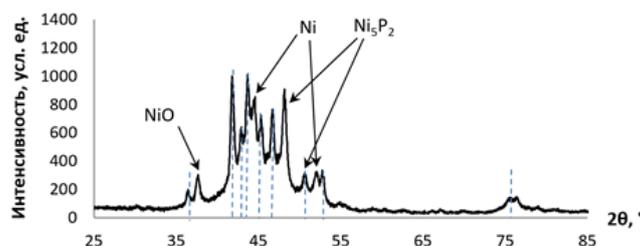


Рис. 5. Рентгенограмма образца Ni-P-W, термообработанного в течение 2 ч при температуре 350°C. Штрих-пунктиром обозначена фаза  $N_3P$

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of a Ni-P-W sample heat-treated for 2 h at 350°C.  $N_3P$  phase is indicated by the dashed line

Измерение элементного состава покрытия по толщине в равноудаленных точках (рис. 6а) показывает, что содержание фосфора, вольфрама и никеля практически постоянно по толщине покрытия, но вблизи границы раздела появляется железо (рис. 6б). При этом расстояние точки, в которой обнаружено железо, до границы раздела двукратно превышает диаметр точечного участка анализа. Это свидетельствует о том, что железо присутствует также и в приграничных слоях покрытия. То есть за 6 ч термообработки произошла диффузия железа в покрытие. Благодаря малой глубине проникновения эта примесь железа не ухудшает эксплуатационных свойств материала, но обеспечивает высокую прочность сцепления покрытий с основным металлом (табл. 2).

Прочность сцепления покрытий проверяли на образцах из Ст20 и холоднокатаной стали 08X18Н10Т методом нанесения сетки царапин по ГОСТ 9.302. Из представленных в таблице результатов следует, что без термической обработки покрытия не удовлетворяют требованиям ГОСТ, после термической обработки в течение 1 ч адгезия к нержавеющей стали 08X18Н10Т остается недостаточной, но после 2 ч отжига прочность сцепления удовлетворительная.

Полученное покрытие, осажденное на Ст20 и термообработанное в течение 2 ч, было подвергнуто экспозиции в 3,5% растворе NaCl. Кривая изменения массы образца во времени

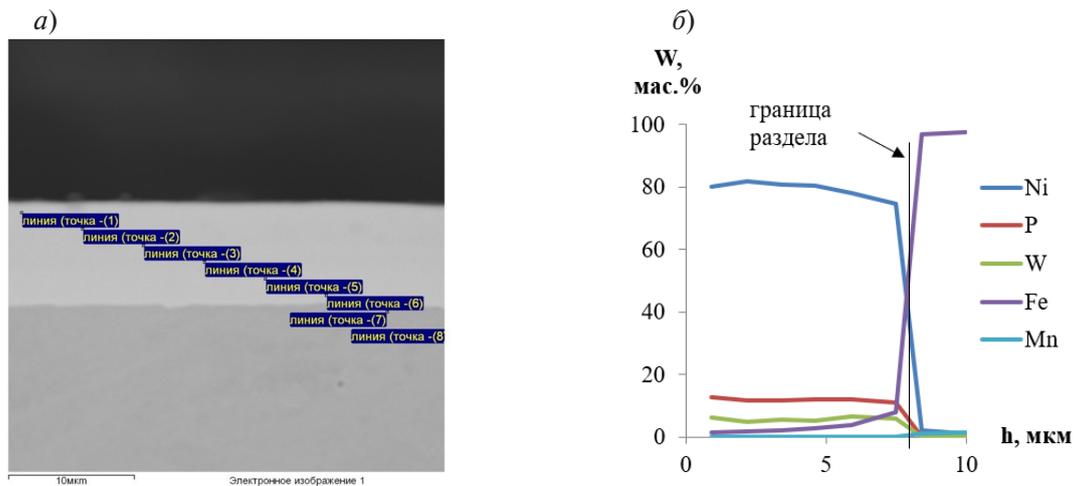


Рис. 6. Расположение точек сканирования химического состава покрытия Ni-P-W после термообработки (а) и профиль элементного состава по толщине покрытия (б)

Fig. 6. Location of scanning points of the chemical composition of the Ni-P-W coating after heat treatment (a) and the profile of the elemental composition across the coating thickness (b)

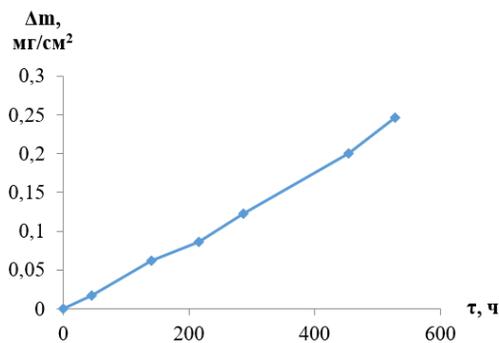


Рис. 7. Изменение массы образца с покрытием во времени экспозиции в 3,5% NaCl

Fig. 7. Change in the mass of the coated sample over the exposure time in 3.5% NaCl

Таблица 2

**Влияние длительности термообработки при 350°С  
на прочность сцепления покрытия Ni-P-W с углеродистой и аустенитной сталью**

Table 2

**Effect of heat treatment duration at 350°С  
on the adhesion strength of Ni-P-W coating to carbon and austenitic steel**

Продолжительность отжига, ч	0	1	2	3	4	5	6
Ст20	—	+	+	+	+	+	+
08X18H10T	—	—	+	+	+	+	+

практически линейна (рис. 7). За время выдержки 528 ч масса образцов изменилась лишь на 0,25 мг/(см<sup>2</sup>·ч), что говорит о высокой коррозионной стойкости покрытия.

Таким образом, по совокупности свойств покрытия Ni-P-W, полученные из цитратного электролита и подвергнутые термообработке 350°C в течение 2 ч, отвечают требованиям, предъявляемым к твердому хромовым покрытиям, не имея при этом существенного недостатка последних – микротрещин – и обеспечивают противокоррозионную защиту.

### Заключение

При нанесении электрохимических покрытий Ni-P-W ярко выражен эффект ингибирования восстановления вольфрама фосфором, и оба легирующих элемента восстанавливаются в условиях конкурирующей адсорбции. Для увеличения скорости восстановления вольфрама и снижения адсорбции фосфора необходимо осаждать покрытие Ni-P-W при высокой температуре электролита. Поскольку температура работы пиродифосфатных электролитов ограничена из-за гидролиза комплексобразователя, для осаждения покрытий Ni-P-W целесообразно использовать цитратный электролит.

Повышение температуры цитратного электролита до 70°C обеспечило включение вольфрама в покрытие в количестве 5,0% при 11,5% фосфора, что согласуется с предположением о конкурирующей адсорбции. Определены условия осаждения покрытия Ni-P-W, содержащего 11,5% P и 5% W, которое после термообработки приобретает микротвердость твердого хромирования и не имеет пор. Термическая обработка покрытия Ni-P-W в течение 2 ч позволяет достичь высокой адгезии покрытия как к углеродистым, так и к нержавеющей сталям, что обусловлено диффузией железа в покрытие. Термически обработанные покрытия Ni-P-W обладают высокой коррозионной стойкостью в 3,5% растворе NaCl.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Красиков А.В.** Влияние концентрации гиподифосфита натрия в пиродифосфатном электролите на состав и свойства электроосажденных покрытий Ni-P // Вопросы материаловедения. 2017. Т. 89, № 1. С. 123–129. DOI: 10.22349/1994-6716-2017-89-1-123-129
- [2] **Krasikov A.V.** Synthesis of nanocomposite coatings based on electrodeposited amorphous Ni–P–W layers, *Inorganic Materials: Applied Research*, 11(6) (2020) 1359–1363. DOI: 10.1134/S207511332006012X
- [3] **Sagedhi S., Ebrahimifar H.** The effect of electroplating current density on microstructure, corrosion, and wear behavior of Ni–P–W–TiO<sub>2</sub> coating, *International Journal of Materials Research*, 112(6) (2021) 474–485. DOI: 10.1515/ijmr-2020-7872
- [4] **Kousar H., Umer M.A., Shehzad K., Ferdous R., Mehmood K., Basit A., Shahbaz T., Yasir M., Sha-koor A.** Exceptional mechanical properties and wear behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforced Ni-W-P coatings, *Tribology International*, 194 (2024) 109533. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109533
- [5] **Biswas P., Das S.K., Sahoo P.** Tribological and corrosion performance of duplex electrodeposited Ni-P/Ni-W-P coatings, *Physica Scripta*, 99(11) (2024) 115018. DOI: 10.1088/1402-4896/ad826e
- [6] **Ahmed S.Y., Mahmoud S.B., Shoeib M.A.** Synthesis, structure characterization, and corrosion properties of duplex electroless Ni-P/Ni-B and Ni-P/Ni-B-W coatings on mild steel, *Scientific Reports*, 14 (2024) 24983. DOI: 10.1038/s41598-024-75883-3
- [7] **Li Q., Hu J., Zhang J., Yang P., Hu Y., An M.** Screening of electroplating additive for improving throwing power of copper pyrophosphate bath via molecular dynamics simulation, *Chemical Physics Letters*, 757 (2020) 137848. DOI: 10.1016/j.cplett.2020.137848
- [8] **Krasikov A.V., Merkulova M.V., Markov M.A., Bykova A.D.** Tungsten-rich Ni-W coatings, electrodeposited from concentrated electrolyte for complex geometry parts protection, *Journal of Physics: Conference Series*, 1758 (2021) 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012019
- [9] **Pereira da Silva C.R., Dantas Costa J., Filgueira de Almeida A., Costa de Santana R.A., Nascimento Campos A.R., Nicácio Alves J.J., de Abreu Santos T.F.** Chemical composition variation of the Ni–W alloy as a

function of parameters used in the electrodeposition process, *Journal of Applied Electrochemistry*, 54 (2024) 611–623. DOI: 10.1007/s10800-023-01992-y

[10] **Ahmad J., Asami K., Takeuchi A., Inoue A.** Effect of sodium hypophosphite on the structure and properties of electrodeposited Ni–W–P alloys, *Materials Transactions*, 44(4) (2003) 705–708. DOI: 10.2320/materialtrans.44.705

[11] **Красиков А.В.** Электроосаждение сплава никель-вольфрам из пирофосфатного электролита. Автореферат дисс. ... канд. хим. наук. СПб., 2012. 20 с.

[12] **Красиков А.В., Красиков В.Л.** Механизм электроосаждения сплава никель-вольфрам из пирофосфатного электролита // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2016. Т. 62, № 36. С. 12–23. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.36.12

[13] **Yamasaki T.** High-strength nanocrystalline Ni-W alloys produced by electrodeposition, *Materials Physics and Mechanics*, 1(2) (2000) 127–132.

[14] **Schloßmacher P., Yamasaki T.** Structural analysis of electroplated amorphous-nanocrystalline Ni-W, *Mikrochimica Acta*, 132 (2000) 309–313. DOI: 10.1007/s006040050074

[15] **Cruywagen J.J., Krüger L., Rohwer E.A.** Complexation of tungsten (VI) with citrate, *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 7 (1991) 1727–1731. DOI: 10.1039/DT9910001727

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**КРАСИКОВ Алексей Владимирович** – начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», канд. хим. наук.

E-mail: Krasikov.av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1625-2347>

**МЕРКУЛОВА Мария Витальевна** – инженер 3-й категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», без степени.

E-mail: merkulovmars@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1772-3103>

**СТАРИЦЫН Михаил Владимирович** – инженер 2-й категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», канд. физ.-мат. наук.

E-mail: ms\_145@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0088-4577>

## REFERENCES

[1] **A.V. Krasikov**, Effect of sodium hypophosphite concentration in pyrophosphate electrolyte on the composition and properties of electrodeposited Ni-P coatings, *Voprosy Materialovedeniya*, 1(89) (2017) 123–129. DOI: 10.22349/1994-6716-2017-89-1-123-129

[2] **A.V. Krasikov**, Synthesis of nanocomposite coatings based on electrodeposited amorphous Ni–P–W layers, *Inorganic Materials: Applied Research*, 11(6) (2020) 1359–1363. DOI: 10.1134/S207511332006012X

[3] **S. Sagedhi, H. Ebrahimifar**, The effect of electroplating current density on microstructure, corrosion, and wear behavior of Ni–P–W–TiO<sub>2</sub> coating, *International Journal of Materials Research*, 112(6) (2021) 474–485. DOI: 10.1515/ijmr-2020-7872

[4] **H. Kousar, M.A. Umer, K. Shehzad, R. Ferdous, K. Mehmood, A. Basit, T. Shahbaz, M. Yasir, A. Shaikoor**, Exceptional mechanical properties and wear behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle reinforced Ni-W-P coatings, *Tribology International*, 194 (2024) 109533. DOI: 10.1016/j.triboint.2024.109533

- [5] **P. Biswas, S.K. Das, P. Sahoo**, Tribological and corrosion performance of duplex electrodeposited Ni-P/Ni-W-P coatings, *Physica Scripta*, 99(11) (2024) 115018. DOI: 10.1088/1402-4896/ad826e
- [6] **S.Y. Ahmed, S.B. Mahmoud, M.A. Shoeib**, Synthesis, structure characterization, and corrosion properties of duplex electroless Ni-P/Ni-B and Ni-P/Ni-B-W coatings on mild steel, *Scientific Reports*, 14 (2024) 24983. DOI: 10.1038/s41598-024-75883-3
- [7] **Q. Li, J. Hu, J. Zhang, P. Yang, Y. Hu, M. An**, Screening of electroplating additive for improving throwing power of copper pyrophosphate bath via molecular dynamics simulation, *Chemical Physics Letters*, 757 (2020) 137848. DOI: 10.1016/j.cplett.2020.137848
- [8] **A.V. Krasikov, M.V. Merkulova, M.A. Markov, A.D. Bykova**, Tungsten-rich Ni-W coatings, electrodeposited from concentrated electrolyte for complex geometry parts protection, *Journal of Physics: Conference Series*, 1758 (2021) 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/1758/1/012019
- [9] **C.R. Pereira da Silva, J. Dantas Costa, A. Filgueira de Almeida, R.A. Costa de Santana, A.R. Nascimento Campos, J.J. Nicácio Alves, T.F. de Abreu Santos**, Chemical composition variation of the Ni–W alloy as a function of parameters used in the electrodeposition process, *Journal of Applied Electrochemistry*, 54 (2024) 611–623. DOI: 10.1007/s10800-023-01992-y
- [10] **J. Ahmad, K. Asami, A. Takeuchi, A. Inoue**, Effect of sodium hypophosphite on the structure and properties of electrodeposited Ni–W–P alloys, *Materials Transactions*, 44(4) (2003) 705–708. DOI: 10.2320/matertrans.44.705
- [11] **A.V. Krasikov**, Elektroosazhdenie splava nikel'-vol'fram iz pirofosfatnogo elektrolita. Diss. kand. khim. nauk [Electrodeposition of nickel-tungsten alloy from pyrophosphate electrolyte. Cand. chem. sci. diss.]. St. Petersburg., 2012.
- [12] **A.V. Krasikov, V.L. Krasikov**, Mechanism of Nickel-Tungsten alloy electrodeposition from pyrophosphate electrolyte, *Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 36(62) (2016) 12–23. DOI: 10.15217/issn1998984-9.2016.36.12
- [13] **T. Yamasaki**, High-strength nanocrystalline Ni-W alloys produced by electrodeposition, *Materials Physics and Mechanics*, 1(2) (2000) 127–132.
- [14] **P. Schloßmacher, T. Yamasaki**, Structural analysis of electroplated amorphous-nanocrystalline Ni-W, *Mikrochimica Acta*, 132 (2000) 309–313. DOI: 10.1007/s006040050074
- [15] **J.J. Cruywagen, L. Krüger, E.A. Rohwer**, Complexation of tungsten (VI) with citrate, *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, 7 (1991) 1727–1731. DOI: 10.1039/DT9910001727

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Aleksey V. KRASIKOV** – NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

E-mail: Krasikov.av@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1625-2347>

**Maria V. MERKULOVA** – NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

E-mail: merkulovmars@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1772-3103>

**Mikhail V. STARITSYN** – NRC “Kurchatov Institute” – CRISM “Prometey”.

E-mail: ms\_145@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0088-4577>

Поступила: 20.05.2025; Одобрена: 22.06.2025; Принята: 24.06.2025.

Submitted: 20.05.2025; Approved: 22.06.2025; Accepted: 24.06.2025.