

ISSN 1561-8331 (Print)  
ISSN 2524-2342 (Online)  
УДК 544.654.2:546:56

Поступила в редакцию 16.02.2017  
Received 16.02.2017

**В. В. Яскельчик, И. М. Жарский, Е. В. Михедова, А. А. Черник**

*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь*

## **ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МЕДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ВВЕДЕНИИ В ЭЛЕКТРОЛИТ МЕДНЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ И АЛМАЗНОЙ ШИХТЫ**

**Аннотация.** Исследованы свойства композиционных медных покрытий с включениями ультрадисперсных алмазов (УДА) и алмазной шихты (АШ) в цитратном электролите меднения. Концентрации алмазосодержащих добавок варьировали в диапазоне 0,2–2 г/л. По изображениям, полученным с помощью растрового электронного микроскопа, определили размеры микрокристаллов меди, частиц УДА и АШ. С помощью рентгенофлуоресцентного анализа установили взаимосвязь между концентрацией алмазосодержащих добавок в электролите и их содержанием в полученных покрытиях. Минимальная микропористость и максимальная микротвердость соответствует концентрации 1,0 г/л как для суспензии с УДА, так и для суспензии с АШ в цитратных электролитах меднения. Покрытия медь-УДА обладают повышенными защитными свойствами (пористость 2 пор/см<sup>2</sup>) и однородностью распределения алмазосодержащих частиц по поверхности в сравнении с монопокрытием и медь-АШ. Для получения композиционных электрохимических покрытий предпочтительнее использовать УДА в цитратном электролите меднения с концентрацией алмазосодержащей добавки 1,0 г/л.

**Ключевые слова:** цитратный электролит меднения, ультрадисперсные алмазы, алмазная шихта, композиционное электрохимическое покрытие

**Для цитирования.** Особенности структуры поверхности медных покрытий при введении в электролит меднения ультрадисперсных алмазов и алмазной шихты / В. В. Яскельчик [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 24–31.

**V. V. Yaskelchik, I. M. Zharski, E. V. Mikhedova, A. A. Chernik**

*Belarusian State Technological University, Minsk, Belarus*

## **STRUCTURAL SURFACE TRANSFORMATIONS OF COPPER COATING WITH INCLUSIONS OF UDD AND DS ADDITIVES IN CITRATE COPPER COATING ELECTROLYTE**

**Abstract.** The properties of composite copper coatings with inclusions of ultradispersed diamonds (UDD) and diamond soot (DS) in copper citrate electrolyte have been investigated. The concentrations of diamond-containing additives have been varied in the range of 0.2–2 g/l. Sizes of copper microcrystals, UDD and DS particles were determined from the scanning electron microscopy images. By means of the X-ray fluorescent analysis, the interrelation between concentration of diamond-bearing additives in electrolyte and their content in the obtained coatings has been established. The minimal microporosity and the maximal microhardness correspond to concentration of 1.0 g/l for both UDD and DS suspensions in citrate copper coating electrolytes. Copper-UDD coating has increased protective properties (porosity 2 time/cm<sup>2</sup>) and uniformity of distribution of diamond-bearing particles on a surface in comparison with a monocoating and copper-DS coating. Using UDD in citrate copper coating electrolyte with a concentration of diamond-bearing additive of 1.0 g/l is more preferable for production of composite electrochemical coatings.

**Keywords:** citrate electrolyte copper coating, ultradispersed diamonds, diamond soot, composite electrochemical coating

**For citation.** Yaskelchik V. V., Zharski I. M., Mikhedova E. V., Chernik A. A. Structural surface transformations of copper coating with inclusions of UDD and DS additives in citrate copper coating electrolyte. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia khimichnykh navuk=Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 24–31 (In Russian).

**Введение.** Для получения композиционных электрохимических покрытий используются такие материалы вторичной фазы как оксиды [1–4], нитриды [4–5], бориды [4–7], карбиды [4, 7–8], алмазосодержащие материалы [9–12]. Введение этих материалов в покрытие повышает износостойкость, микротвердость, коррозионную стойкость [1–8, 13] и придает антифрикционные и каталитические свойства [13, 14]. Большое внимание исследователей направлено на создание композиционных покрытий с алмазосодержащими материалами [15]. Из этих материалов выделяют ультрадисперсные алмазы (УДА или наноалмазы) [10, 16] и алмазную шихту (АШ) [10, 16]

детонационного синтеза. Детонационные наноалмазы обладают уникальными свойствами [10–16] благодаря особой структуре. Они имеют алмазное ядро, углеродную оболочку вокруг ядра и поверхностный слой (функциональные группы) [10, 16]. Наличие функциональных групп на поверхности наноалмазов способствует закреплению частиц в матрице металла под действием адсорбционных и электростатических сил, а также движение их в электрическом поле [13, 15, 16]. Вместе с тем частицы доставляются к образцу в результате броуновского движения и гравитационных сил [13, 15, 16].

Электроосаждение композиционных электрохимических покрытий осуществляли из цитратного электролита меднения, который полностью исключал контактное вытеснение меди на стали [17–19], с добавлением УДА и АШ в качестве дисперсной фазы.

Цель настоящей работы – исследование структуры и эксплуатационных свойств композиционных медных покрытий в зависимости от концентрации ультрадисперсных порошков алмазосодержащей дисперсной фазы.

**Методика исследований.** Для проведения исследований применяли электролит следующего состава (г/л):  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  – 50–150; лимонная кислота – 30–70;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 50–350;  $\text{NaCl}$  – 0–50;  $\text{NaOH}$  до pH 7,5–8,5 [17], в качестве дисперсной фазы использовали УДА и АШ – наноалмазы детонационного синтеза производства ЗАО «СИНТА» (г. Минск, Беларусь) [16].

Для поддержания во взвешенном состоянии частиц УДА и АШ осуществляли механическое перемешивание через каждые 10 мин. В качестве подложки для осаждения покрытий использовали сталь марки Ст3.

С помощью растрового электронного микроскопа X-Act ADD + JSM-5900LV Jeol (г. Токио, Япония) получали изображения поверхности покрытий. Рентгенофлуоресцентным волнодисперсионным спектрометром последовательного действия XRF-1800 (г. Токио, Япония) с детекторами на углерод (чувствительность <0,01 %) определяли процентное содержание атомов углерода в покрытиях. Измерения микротвердости проводились на микротвердомерах ПМТ-3 (г. Москва, Россия) и AFFI-MVDM8 (г. Венеция, Италия). Микропористость определяли методом наложения фильтровальной бумаги по ГОСТу 9.302–88.

**Результаты и их обсуждение.** Из изображений покрытий (рис. 1, а) следует, что в покрытии без алмазосодержащих добавок морфология поверхности более однородная, чем в покрытиях с добавками АШ и УДА (рис. 1, б, в). Диапазон размеров микрокристаллов меди в монопокрытии соответствует 30–115 нм с максимумом 50 нм, а также незначительное количество кристаллов размером до 250 нм (рис. 2). В монопокрытии микрокристаллы перекрываются без видимой границы, что может снижать подвижность кристаллов и при механической нагрузке, от возникающих внутренних напряжений приводить к снижению эластичности покрытия [15]. На рис. 1, б размеры микрокристаллов меньше чем в покрытии без добавок (рис. 1, а) и составляют 11–100 нм с максимумом при 32 нм (рис. 2). Размеры микрокристаллов могли уменьшаться из-за влияния АШ на процесс образования и роста зародышей кристаллов [13, 16]. Вместе с тем более светлые участки на поверхности (рис. 1, б) могут быть обусловлены частицами алмазной шихты, которая вследствие присущей алмазам низкой электропроводности плохо контактирует с подложкой. На изображении (рис. 1, б) размеры частиц АШ меньше микрокристаллов меди (рис. 1, а). Также частицы АШ образуют агрегаты размерами около 500 нм (рис. 1, б), так как АШ в цитратном электролите меднения в большой степени склонна к агрегации, чем УДА. На лазерном дифракционном анализаторе установлено, что АШ имеет агрегаты размерами от 0,4 до 3,5 мкм с максимумом при 0,6 мкм. Поэтому в процессе измерения микротвердости при вдавлении индентор мог попадать в область агрегатов, что в свою очередь могло приводить к повышенным значениям микротвердости (рис. 5).

Поверхность композиционного электрохимического покрытия медь–УДА (рис. 1, а) закрыта частицами УДА, которые имеют овальную форму (длина:ширина ~ 2:1) с преимущественными размерами по длине 70 нм и диапазоном размеров частиц от 32 до 130 нм. Однако на лазерном дифракционном анализаторе установлено, что исходные УДА имеют форму частиц близкую к сферическим с размерами от 50 до 158 нм и максимумом при 65 нм. Овальную форму частицы могли приобрести под действием электрического поля или компонентов цитратного электролита

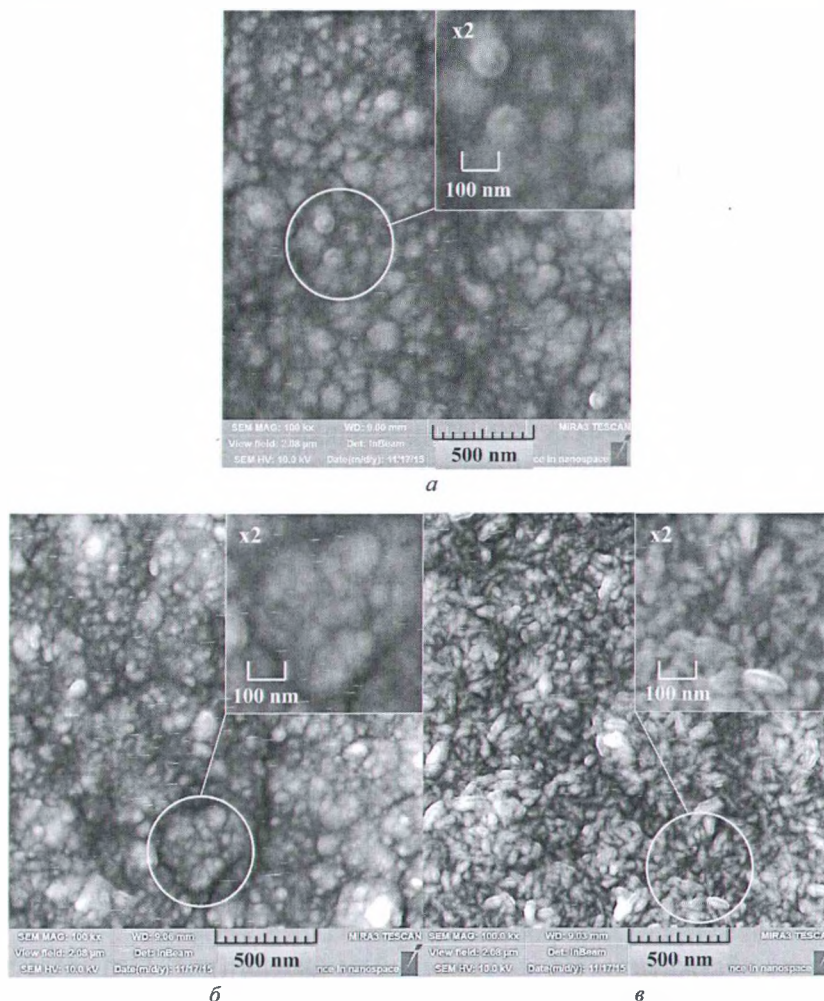


Рис. 1. Микроструктура медных покрытий  $\times 100$  кХ: *а* – медь–АШ, *б* – медь–УДА, *в* – монопокрытие меди.  
Концентрация композиционных частиц 1,0 г/л и плотность тока 1,7 А/дм<sup>2</sup>

Fig. 1. Microstructure of copper coatings at 100 kX magnification: *a* – copper-DS, *б* – copper-UDD, *в* – copper monocoating.  
Composite particles concentration 1.0 g/l and current density 1.7 A/dm<sup>2</sup>

меднения. Образующиеся микротрещины в процессе электроосаждения меди закрываются УДА (рис. 1, *в*), что приводит к снижению пористости (рис. 6) покрытия медь–УДА. Эта отличительная особенность покрытия медь–УДА способствует повышению защитных свойств покрытий при нанесении на стальную подложку [18, 19].

При повышении концентрации УДА в электролите меднения до 1,0 г/л на изображениях (рис. 3) наблюдалось увеличение количества частиц УДА овальной формы и степени укрытия поверхности агрегатами УДА. Дальнейшее повышение концентрации УДА приводило к уменьшению количества обособленных частиц УДА. При повышении концентрации УДА ускорялись процессы агрегации, в результате чего в электролите уменьшалось количество обособленных частиц УДА. Крупные агрегаты затрудняли закрепление УДА и ухудшали однородность свойств по поверхности из-за локального закрепления агрегатов УДА на поверхности медной матрицы [15, 16].

При концентрации 0,2 г/л АШ в электролите (рис. 4, *а*) можно выделить сферолиты размерами от 250 до 400 нм. Повышение концентрации АШ до 1,0 г/л (рис. 4, *б*) в цитратном электролите меднения уменьшает размеры обособленных сферолитов (200–330 нм). При концентрации 1,5 г/л АШ в ЦЭМ (рис. 4, *в*) сферолиты увеличились до 440 нм. Последующее повышение концентрации АШ до 2,0 г/л (рис. 3, *з*) также уменьшает количество и размеры обособленных сферолитов, но поверхность покрытия однороднее в сравнении с покрытиями при концентрациях 0,2–1,5 г/л АШ в электролите.

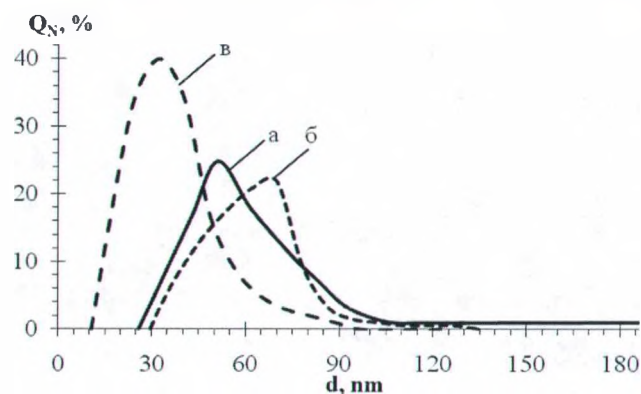


Рис. 2. Численное распределение по размерам микрокристаллов в монопокрытии (а), медь–УДА (б), медь–АШ (в)  
 Fig.2. Size distribution of microcrystals in monocoating (a), copper–UDD (б), copper–DS coating (в)

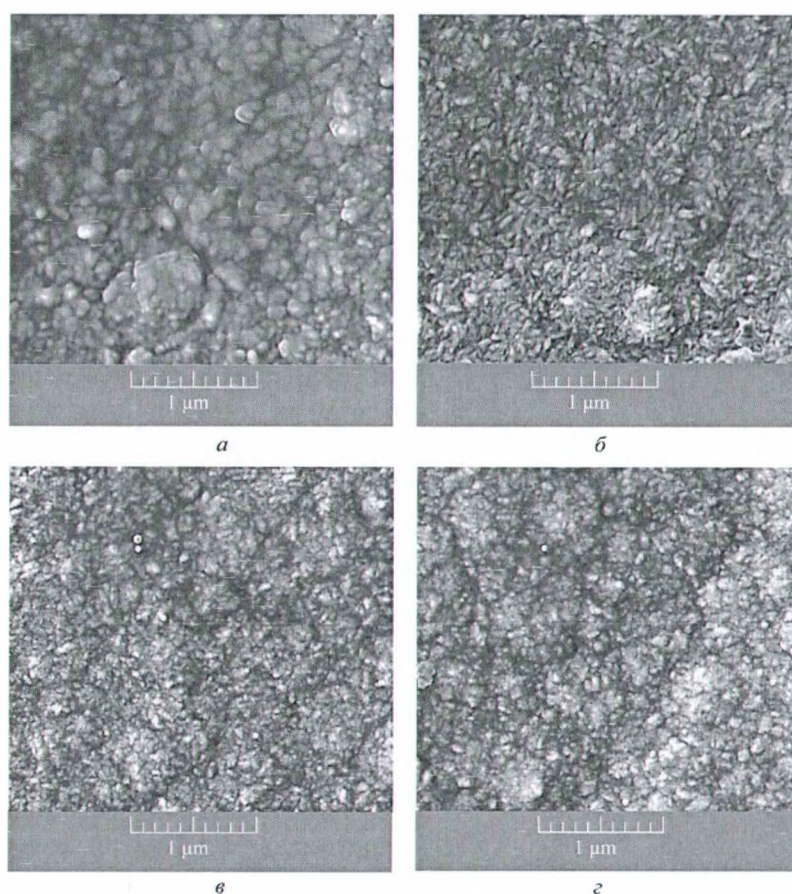


Рис. 3. Микрофотографии покрытий (×50 кх) медь–УДА. Концентрация УДА в электролите, г/л:  
 а – 0,2; б – 1,0; в – 1,5; г – 2,0  
 Fig. 3. SEM images of copper–UDD coating (magnification 50 kX). UDD concentration in the electrolyte, g/l:  
 а – 0,2; б – 1,0; в – 1,5; г – 2,0

Из рис. 5 (кривая, а) следует, что при повышении концентрации УДА до 1,0 г/л в электролите меднения наблюдается увеличение содержания УДА в покрытии до 0,2 %. Уменьшение содержания углерода в композиционных электрохимических покрытиях наблюдается при концентрации УДА в электролите, равной 1,5 г/л. Это может быть связано с увеличением скорости агрегации частиц УДА. При повышении концентрации УДА от 1,5 до 2,0 г/л в объеме раствора повышается количество УДА в покрытии от 0,15 до 0,21 % благодаря увеличению доли алмазосодержащих частиц в электролите.

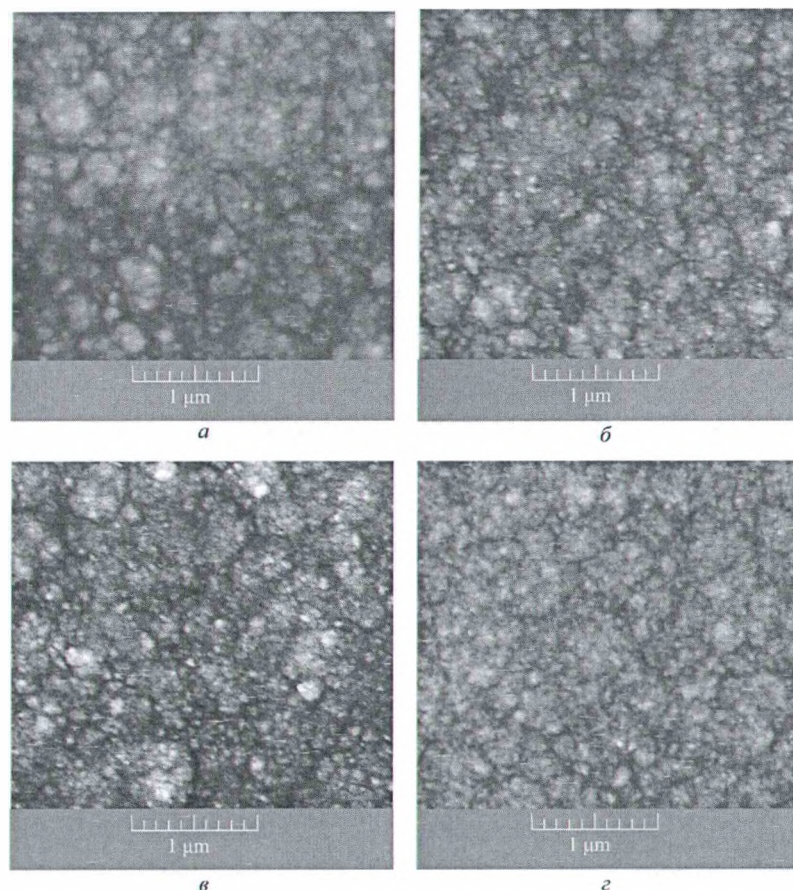


Рис. 4. Микрофотографии покрытий ( $\times 50$  кХ) медь–АШ. Концентрация АШ в электролите, г/л:  
*a* – 0,2; *б* – 1,0; *в* – 1,5; *г* – 2,0

Fig. 4. SEM images of copper-DS coating (magnification 50 kX). DS concentration in the electrolyte, g/l:  
*a* – 0.2; *б* – 1.0; *в* – 1.5; *г* – 2.0

При концентрациях АШ в электролите от 0,2 до 1,0 г/л (рис. 5, *б*) наблюдается увеличение содержания АШ в покрытии от 0,13 до 0,25 %. Повышение концентрации АШ более 1,0 г/л в ЦЭМ приводит к снижению содержания АШ в покрытии до 0,18 % (АШ 2,0 г/л). Это может быть связано с тем, что при повышении концентрации более 1,0 г/л ускоряются процессы агрегации АШ и содержание частиц взвешенной фазы уменьшается в объеме раствора.

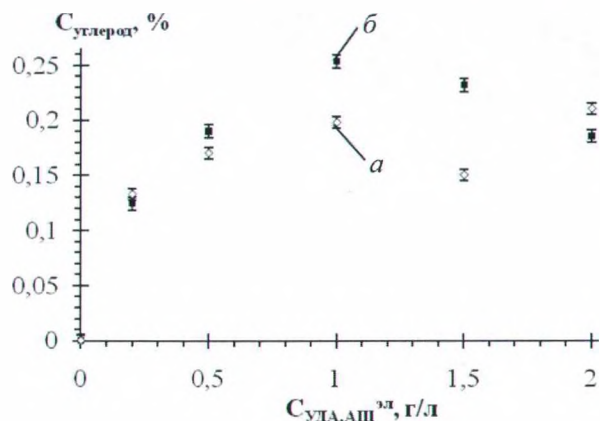


Рис. 5. Зависимость количества углерода в покрытии от концентрации УДА (*a*) и АШ (*б*) в электролите

Fig. 5. Carbon content in the coating versus UDD (*a*) and DS (*б*) concentration in the electrolyte

Результаты полученной зависимости о микротвердости покрытий от концентрации УДА и АШ в электролите (рис. 6) коррелируют с данными по содержанию углерода в исследуемых покрытиях (рис. 5). Максимальная микротвердость достигается при концентрации 1,0 г/л АШ, а также при 1,0 г/л УДА (рис. 6) и равна 156 и 112 НВ соответственно. Повышенное значение микротвердости покрытия медь–АШ может быть связано с влиянием АШ на процесс электроосаждения меди (выступать в роли центров кристаллизации, дефектных точек зародышеобразования) [13, 15], а также с агрегатами АШ, закрепляемыми в медном покрытии. Вследствие агрегации меняется фракционный состав суспензии

и образующиеся агрегаты закрепляются на поверхности, создают неоднородность свойств по плоскости покрытия, что приводит к изменению глубины вдавливания индентера микротвердомера и увеличению значения микротвердости.

При концентрации 1,5 г/л УДА в электролите наблюдалось снижение микротвердости до 87 НВ (рис. 6), при этом доля алмазосодержащих частиц в покрытии составила 0,15 % (рис. 5). Это может быть связано с изменением скорости агрегации УДА в исследуемом электролите при концентрации 1,5 г/л. При повышении содержания УДА в растворе от 1,5 до 2,0 г/л свойства композиционных электрохимических покрытий восстанавливались или частично восстанавливались: микротвердость – 103 НВ, доля алмазосодержащих частиц – 0,21 %, пористость – 5 пор/см<sup>2</sup>.

Микропористость для покрытий медь–УДА (рис. 6, б) меньше, чем для монопокрытия меди (рис. 6, а). Покрытие медь–АШ при концентрациях АШ в электролите от 0,5 до 1,5 г/л обладает меньшей микропористостью, чем монопокрытие. Минимальная микропористость зафиксирована в покрытиях, полученных при концентрациях УДА и АШ, равных 1,0 г/л, и составила 2 и 4 пор/см<sup>2</sup> соответственно. Это может быть связано как с влиянием алмазосодержащих добавок на процесс электроосаждения, так и вследствие укрупнения пор наночастицами. Следовательно, для вкрапления алмазосодержащих материалов в медное покрытие наиболее рационально использовать УДА и АШ в размере 1,0 г/л. Введение в цитратный электролит меднения УДА способствует повышению износостойкости в 3,5 раза [17]. Это обусловлено как внедрением в покрытие УДА, так и в результате изменения размеров микрозерен меди в покрытии.

**Заключение.** Установлено, что диапазон размеров микрокристаллов меди для монопокрытия соответствует 30–250 нм с максимумом 50 нм, для медь–АШ 11–100 нм с максимумом при 32 нм. Частицы УДА имеют овальную форму (длина:ширина ~ 2:1) с преимущественными размерами по длине 70 нм и диапазоном размеров частиц от 32 до 130 нм. При концентрациях АШ в цитратном электролите меднения от 0,2 до 1,0 г/л наблюдается увеличение содержания АШ в покрытии от 0,13 до 0,25 %. Повышение концентрации УДА в электролите от 0,2 до 1,0 г/л способствует увеличению УДА в покрытии от 0,13 до 0,2 %. Минимальная микропористость 2 пор/см<sup>2</sup> для УДА и 4 пор/см<sup>2</sup> для АШ достигается в покрытиях, полученных при концентрациях алмазосодержащих добавок 1,0 г/л. Максимальная микротвердость составляет 156 НВ при концентрации 1,0 г/л АШ, а также 112 НВ при содержании 1,0 г/л УДА. Увеличение концентрации АШ и УДА в электролитах более 1,0 г/л не приводит к повышению эксплуатационных характеристик (микротвердости, микропористости, износостойкости). Полученная зависимость микротвердости покрытий от концентрации УДА и АШ в электролите коррелирует с данными по содержанию углерода в исследуемых покрытиях и микропористостью, а также сопоставляется с изображениями, полученными на растровом электронном микроскопе.

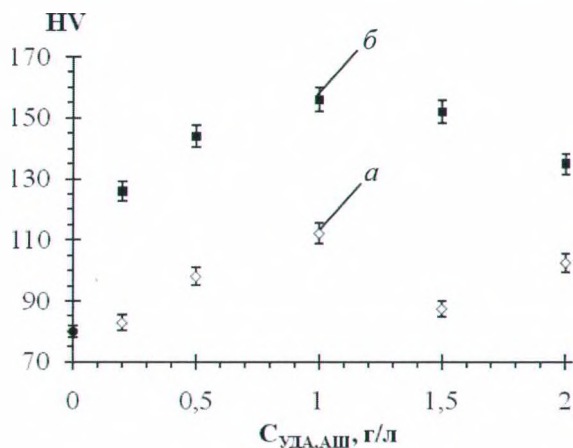


Рис. 6. Зависимость микротвердости композиционных электрохимических покрытий от концентрации УДА (а) и АШ (б) в электролите меднения

Fig. 6. Microhardness of composite electrochemical coatings versus UDD (a) and DS (b) concentration in the copper coating electrolyte

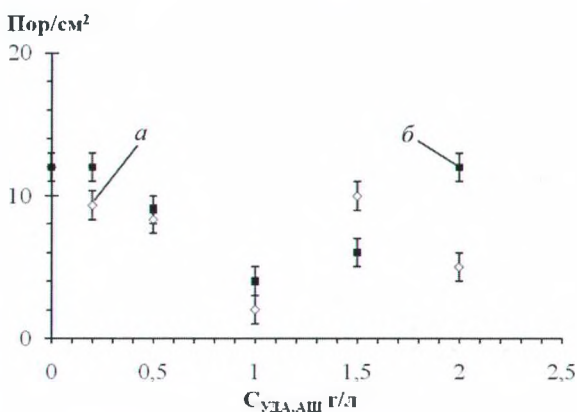


Рис. 7. Микропористость покрытий при повышении концентрации УДА (а), АШ (б) в электролите меднения

Fig. 7. Microporosity of the coatings with the increase of UDD (a) and DS (b) concentration in the copper coating electrolyte

Покрyтия медь–УДА обладают повышенными защитными свойствами (пористость 2 пор/см<sup>2</sup>) и однородностью распределения алмазосодержащих частиц по поверхности в сравнении с монопокрытием и медь–АШ. Поэтому для получения композиционных электрохимических покрытий предпочтительнее использовать УДА в цитратном электролите меднения с концентрацией алмазосодержащей добавки 1,0 г/л. Полученные результаты эксперимента могут быть применены при создании композиционных медных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами.

#### Список использованных источников

1. Водопьянова, С. В. Композиционные электрохимические покрытия с матрицей из кадмия / С. В. Водопьянова, Р. С. Сайфуллин // Вестник казанского технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 9. – С. 69–73.
2. Петрова, Е. В. Получение и физические свойства композиционных материалов на основе наноразмерных оксида цинка и металлов триады железа / Е. В. Петрова, Л. Ф. Дресвяников, И. И. Хисматова, Р. Р. Мустафина // Вестник казанского технологического университета. – 2012. – Т. 15, № 14. – С. 64–66.
3. Hosseini, M. G. Electropolymerization of Polypyrrole and Polypyrrole–ZnO Nanocomposites on Mild Steel and Its Corrosion Protection Performance / M. G. Hosseini, R. Bagheri, R. Najjar // Journal of Applied Polymer Science. – 2011. – Vol. 121, pp. 3159–3166.
4. Андриевский, Р. А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Российский химический журнал. – 2002. – Т. 46, № 5. – С. 50–56.
5. Способ осаждения композиционных покрытий никель–ванадий–фосфор–нитрид бора : патент 2437967 Российской Федерации / А. А. Тихонов; Дата публ.: 01.07.2010.
6. Ночдрии, И. В. Электроосаждение и свойства гальванических композиционных покрытий цинк – борид хрома CrB<sub>2</sub> / И. В. Ночдрии, В. В. Руднева, Г. В. Галевский // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – № 3 (5). – С. 43–46.
7. Получение и свойства композиционного покрытия на основе никеля / В. В. Иванов [и др.] // Успехи современного естествознания. – 2015. – № 1 (8). – С. 1335–1338.
8. Галевский, Г. В. Электроосаждение, структура и свойства композиционного покрытия «никель – карбид титана» / Г. В. Галевский, В. В. Руднева, А. К. Гарбузова // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015 – Т. 214, № 1. – С. 154–164.
9. Schrand, A. M. Nanodiamond Particles: Properties and Perspectives for Bioapplications / A. M. Schrand, S. A. C. Hens, O. A. Shenderov // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2009. – Vol. 34, N. 1. – P. 18–74.
10. Vadym, N. M. The properties and applications of nanodiamonds / N. M. Vadym, O. Shenderova, D. Ho and Yu. Gogotsi // Nature nanotechnology. – 2012. – Vol. 7, N. 1. – P. 11–23.
11. Характеризация структуры ультрадисперсного алмаза с помощью методов рентгеновской дифрактометрии и малоуглового рассеяния рентгеновских лучей / М. Д. Шарков [и др.] // Физика твердого тела. – 2014. – Т. 56, № 11. – С. 2265–2268.
12. Беленков, Е. А. Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. Компьютерное материаловедение / Е. А. Беленков, В. В. Ивановская, А. Л. Ивановский. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 169 с.
13. Целуйкин, В. Н. Композиционные электрохимические покрытия: получение, структура, свойства / В. Н. Целуйкин // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2009 – Т. 45, № 3. – С. 287–301.
14. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П. А. Витязь [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2013. – 381 с.
15. Буркат, Г. К. Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике / Г. К. Буркат, В. Ю. Долматов // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, № 4. – С. 685–692.
16. Долматов, В. Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение / В. Ю. Долматов. – СПб: НПО «Профессионал», 2011. – 536 с.
17. Получение и свойства медных покрытий из цитратного электролита в присутствии ультрадисперсных алмазов / В. В. Яскельчик [и др.] // Изв. С-Пб. гос. технол. ин-та. – 2015. – № 28(54). – С. 25–28.
18. Осинцев, О. Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с., ил.
19. Шапник, М. С. Комплексы в гальванотехнике / М. С. Шапник // Соросовский образоват. журн. – 1996. – № 9. – С. 64–71.

#### References

1. Vodop'janova S. V., Sajfullin R. S. Composite electrochemical coatings with a matrix of cadmium. *Vestnik kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Herald of Kazan Technological University*, 2016, vol. 9, no. 19, pp. 69–73 (in Russian).
2. Petrova E. V., Dresvjaniikov L. F., Hismatova I. I., Mustafina R. R. Preparation and physical properties of composite materials based on nanoscale zinc oxide and iron triad metals. *Vestnik kazanskogo tehnologicheskogo universiteta = Herald of Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, no. 15, pp. 64–66 (in Russian).
3. Hosseini M. G., Bagheri R., Najjar R. Electropolymerization of Polypyrrole and Polypyrrole–ZnO Nanocomposites on Mild Steel and Its Corrosion Protection Performance. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, vol. 121, no. 6, pp. 3159–3166. Doi: 10.1002/app.33952.

4. Andrievskii R. A. *Nanomaterials: the concept and the modern problems*. Rossiiskii khimicheskii zhurnal = Russian Journal of General Chemistry, 2002, vol. 46, no. 5, pp. 50–56 (in Russian).
5. Tihonov A. A. *The method for deposition of composite coatings of nickel–vanadium–phosphorus–boron nitride*. Patent Russian Federation no. 2437967. (in Russian).
6. Nochdrii I. V., Rudneva V. V., Galevskij G. V. Electrodeposition and properties of galvanic composite coatings of chromium zinc–boride CrB<sub>2</sub>. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta = Bulletin of the Siberian State Industrial University*, no. 3 (5), pp. 43–46 (in Russian).
7. Ivanov V. V., Balakay V. I., Shherbakov I. N., Arzumanova A. V., Starun A. V., Murzenko K. V. Preparation and properties of a composite coating based on nickel. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya = Advances in current natural sciences*, 2015, no. 1 (8), pp. 1335–1338 (in Russian).
8. Galevsky G. V., Rudneva V. V., Garbuzova A. K. Electrodeposition, structure and properties of the composite coating «nickel–titanium carbide». *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta = St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2015, vol. 214, no. 1, pp.154–164. Doi: 10.8562/JEST.214.18
9. Schrand A. M., Hens S. A. C., Shenderov O. A. Nanodiamond Particles: Properties and Perspectives for Bioapplications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2009, vol. 34, no. 1, pp. 18–74. Doi: 10.1080/10408430902831987
10. Vadym N. M., Shenderova O., Ho D., Gogotsi Yu. The properties and applications of nanodiamonds. *Nature nanotechnology*, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 11–23. Doi: 10.1038/nnano.2011.209
11. Sharkov M. D., Boiko M. E., Ivashevskaya S. N., Konnikov S. G. *Characterization of the structure of ultradisperse diamond by means of X-ray diffractometry and small-angle x-ray scattering*. *Physics of the Solid State*, 2014, vol. 56, no. 11, pp. 2343–2347. Doi: 0.1134/s1063783414110250
12. Belenkov E. A., Ivanovskaya V. V., Ivanovskii A. L. Nanodiamonds and congenerous carbon nanomaterials. Computer materials science. Ekaterinburg, Ural office of the Russian Academy of Sciences, 2008. 169 p. (in Russian).
13. Tseluikin V. N. Composite electrochemical coatings: production, structure, properties. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2009, vol. 45, no. 3, pp. 312–326. Doi: 10.1134/s2070205109030083
14. Vityaz' P. A.. *Nanodiamonds of detonation synthesis: preparation and application*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2013. 381 p. (in Russian).
15. Burkat G. K., Dolmatov V. Yu. *Ultradispersible diamonds in galvanotechnics*. *Physics of the Solid State*, 2004, vol. 46, no. 4, pp. 685–692. Doi: 10.1134/1.1711455
16. Dolmatov V. Yu. *Detonation nanodiamonds. Preparation, properties, application*. St. Petersburg, Professional Publ., 2011. 536 p. (in Russian).
17. Yaskel'chik V. V., Zharskii I. M., Burkat G. K., Chernik A. A., Mikhedova E. V. Production and properties of copper coatings from citrate electrolyte in the presence of ultradispersed diamonds. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo institute = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2015, no. 28(54), pp. 25–28 (in Russian).
18. Osintsev O. E., Fedorov V. N. *Copper and copper alloys. Domestic and foreign brands: reference book*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 336 p. (in Russian).
19. Shapnik M. S. Complexes in galvanotechnics. *Sorosovckii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros educational journal*, 1996, no. 9, pp. 64–71 (in Russian).

### Информация об авторах

*Яскельчык Валентин Валентинович* – аспирант, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yaskelchyk@gmail.com

*Жарский Иван Михайлович* – канд. хим. наук, профессор, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ivanzharsky@belstu.by

*Михедова Елена Викторовна* – ассистент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mihedka@mail.ru

*Черник Александр Александрович* – канд. хим. наук, доцент, зав. кафедрой, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexachernik@belstu.by

### Information about the authors

*Valentin V. Yaskelchik* – Postgraduate student, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yaskelchyk@gmail.com

*Ivan M. Zharski* – Ph. D. (Chemistry), Professor, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ivanzharsky@belstu.by

*Elena V. Mikhedova* – Assistant, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mihedka@mail.ru

*Alexandr A. Chernik* – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Head of the Department, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexachernik@belstu.by