

УДК 544.654.2:546:56

**В. В. Яскельчик, М. В. Ананьев, И. М. Жарский,
Т. Н. Останина, Н. И. Останин, А. А. Черник**

СЕДИМЕНТАЦИЯ АЛМАЗНОЙ ШИХТЫ В ЦИТРАТНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ МЕДНЕНИЯ

Ключевые слова: седиментация, агрегация, цитратный электролит меднения, алмазная шихта (АШ), композиционное электрохимическое покрытие, распределение по размерам.

Композиционные электрохимические покрытия получают из электролитов-суспензий, в которых в качестве второй фазы применяют высокодисперсные порошки. При электроосаждении композиционных покрытий в электролите активно протекают процессы агрегации наночастиц алмазной шихты с образованием агломератов микронного размера. Вследствие этого затрудняется закрепление частиц дисперсной фазы на металлической матрице, что ухудшает равномерность распределения частиц в объеме покрытия и свойства осадка. Поэтому проведены исследования процессов агрегации и седиментации алмазной шихты в цитратном электролите меднения, используемом для получения композиционных электрохимических покрытий. Содержание алмазной шихты в электролите варьировалось в пределах от 0,2 до 2,0 г/л. В качестве алмазной шихты использовался продукт детонационного синтеза производства ЗАО «СИНТА» (Беларусь), представляющий собой водную 7% суспензию. Частицы алмазосодержащей шихты состояли из сверхтвердого и инертного алмазного ядра, покрытого оболочкой из графита, аморфного и луковичного углерода. На поверхности частиц имелись функциональные группы, способные активно участвовать в различных химических реакциях. С помощью лазерного дифракционного анализатора Malvern Mastersizer 2000 определено распределение частиц алмазной шихты по размерам в электролите сразу после приготовления суспензии и после 10 суток выдержки. Агрегативная и седиментационная устойчивость суспензии алмазной шихты в цитратном электролите меднения исследованы гравиметрическим методом. Анализ зависимости массы оседающих частиц алмазной шихты от времени $Q=f(t)$ позволил установить, что на седиментационную устойчивость существенное влияние оказывает процесс агрегации частиц, интенсивность которого увеличивалась с повышением концентрации алмазной шихты. Наибольшая агрегативная и седиментационная устойчивость наблюдается для суспензии алмазной шихты в цитратном электролите с концентрацией 0,2 г/л. При концентрации алмазной шихты 0,5 г/л и выше в цитратном электролите меднения наблюдалось снижение агрегативной устойчивости. Установлено, что при содержании 1,0 г/л алмазной шихты в растворе содержится достаточное количество дисперсной фазы при удовлетворительной седиментационной устойчивости, что позволило получить медные покрытия с малой пористостью и повышенной износостойкостью по сравнению с медным покрытием без добавок алмазной шихты.

**V. V. Yaskelchik, M. V. Ananyev, I. M. Zharskiy,
T. N. Ostanina, N. I. Ostanin, A. A. Chernik**

DIAMOND SOOT SEDIMENTATION IN CITRATE-BASED COPPER-COATING ELECTROLYTE

Keywords: sedimentation, aggregation, citrate-based copper-coating electrolyte, diamond soot (DS), electrochemical composite plating, size distribution.

Electrochemical composite coatings are obtained from suspended electrolytes, in which highly dispersed powders are used as the second phase. In electro-deposition of composite coatings in electrolyte, diamond soot nanoparticles aggregation processes run actively, forming micron-sized agglomerates. Due to this, fixing the disperse phase particles on a metal matrix is complicated, which worsens the uniformity of particles distribution within the coating volume and the properties of the deposit. Therefore, we have studied diamond soot aggregation and sedimentation processes in the citrate-based copper-coating electrolyte used to obtain electrochemical composite coatings. Diamond soot content in electrolyte varies within the range of 0.2-2.0 g/l. As diamond soot, we used the detonation synthesis product manufactured by SINTA, Belarus, representing 7% water suspension. Diamond-containing soot particles consisted of super-hard and inert diamond core covered with a shell of graphite, amorphous carbon, and onion-shaped carbon. On the surfaces of the particles, there were functional groups capable of being actively involved in various chemical reactions. Using laser-induced diffraction analyzer Malvern Mastersizer 2000, we have identified the distribution of diamond soot particles by sizes in the electrolyte immediately upon preparing the suspension and after 10 hold-up days. Using gravimetric method, we have studied the aggregate and sedimentation stabilities of the diamond soot suspension in citrate-based copper-coating electrolyte. Analyzing the precipitating diamond soot particles dependence upon time $Q=f(t)$ has allowed us to find that the sedimentation stability is essentially affected by the process of aggregating the particles, the intensity of which increased with increasing the concentration of diamond soot. The highest aggregation and sedimentation stability was observed for the diamond soot suspension in citrate-based copper-coating electrolyte with the concentration of 0.2 g/l. At the diamond soot concentration of 0.5 g/l or higher, the aggregation stability reduction was observed in citrate-based copper-coating electrolyte. It is found that, if the content of diamond soot in the solution is 1.0 g/l, the disperse phase is sufficient for the satisfactory sedimentation stability, which has allowed us to obtain copper coatings of low porosity and enhanced durability, as compared to copper coatings without adding diamond soot.

Введение

В последнее время большой интерес представляет новое поколение гальванических покрытий –

композиционные электрохимические покрытия (КЭП) [1-10].

Композиционные электрохимические покрытия получают из электролитов-суспензий, в которых в качестве второй фазы применяют высокодисперсные порошки. Известно, что введение твердых дисперсных частиц (оксидов, нитридов, боридов, карбидов, алмазосодержащих материалов) в электрохимические покрытия повышает их микротвердость и износостойкость. Осаждаемые с металлом микро- и наночастицы играют роль центров кристаллизации [1, 10-11]. Замена классических гальванопокрытий на КЭП позволяет экономить дорогостоящие цветные металлы и удешевляет процесс электроосаждения [11-13].

Среди дисперсных частиц особое место занимают аллотропные модификации углерода (алмаз, лонсдейлит, гексагональный и ромбоэдрический графит и др.), а также многочисленные формы технического и минерального углерода (кокс, природный графит, антрацит, стеклоуглерод, углесталл и др.). На основе этих наполнителей разработано множество современных композиционных материалов (конструкционных, инструментальных, ядерных, теплозащитных, ювелирных, полимерных, резиновых и т. д.) [14]. Однако для получения композиционных гальванических покрытий наибольший интерес вызывают алмазосодержащие наночастицы детонационного синтеза (АНДС): ультрадисперсные алмазы (УДА) и алмазная шихта (АШ). Это связано со специфическими свойствами АНДС: твердостью алмазного ядра и наличием периферической оболочки и функциональных групп на поверхности частицы [14-17]. Главное преимущество АШ заключается в ее низкой стоимости по сравнению с УДА, так как АШ – продукт первичного синтеза, а УДА – продукт очистки АШ [14-15, 18].

Частицы алмазосодержащей шихты состоят из сверхтвердого и инертного алмазного ядра, покрытого оболочкой из графита, аморфного и луковичного углерода. На поверхности частиц имеются функциональные группы, способные активно участвовать в различных химических реакциях [14-17]. Размер частиц АШ, рассчитанный по области когерентного рассеяния для кристаллической алмазной фазы равен порядка 5 нм, однако в процессе получения наноалмазы агрегируют до 50 нм [17].

При электроосаждении композиционных покрытий в электролите активно протекают процессы агрегации наночастиц АШ с образованием агломератов микронного размера. Вследствие этого затрудняется закрепление частиц дисперсной фазы на металлической матрице, что ухудшает равномерность распределения частиц в объеме покрытия и свойства осадка. В связи с этим в литературе большое внимание уделяется вопросу диспергирования ультрадисперсных порошков [19].

Для обеспечения седиментационной устойчивости дисперсной фазы в электролите используют различные приемы: перемешивание электролита [20]; введение в раствор ПАВ [20-22], активация электролита-суспензии с ПАВ в

дизинтеграторе [22]; обработка электролита-суспензии ультразвуком [22-23]; использование модифицированных частиц дисперсной фазы [24]; циклическое изменение скорости перемешивания электролита.

Целью настоящей работы являлось исследование седиментационной и агрегативной устойчивости частиц алмазосодержащей шихты в цитратном электролите меднения и выбор концентрации дисперсной фазы, необходимой для получения износостойчивых КЭП с малой пористостью.

Методика исследований

Дисперсионной средой при выполнении седиментационного анализа служил цитратный электролит меднения (ЦЭМ) [25,26], содержащий (г/л): $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - 100; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ - 120; лимонная кислота - 58, NaOH до pH=8,0. В качестве АШ использовали продукт детонационного синтеза производства ЗАО «СИНТА» (Беларусь), представляющий собой водную 7% суспензию [14].

Анализ размеров частиц в исходной суспензии АШ, а также гранулометрический состав суспензии в ЦЭМ сразу после приготовления и после 5 - 10 суток выдержки проводили на лазерном дифракционном анализаторе Malvern Mastersizer 2000 при непрерывной циркуляции и разбавлении суспензии водой (в 10-20 раз) [27]. Малая концентрация частиц АШ и постоянное перемешивание способствовали снижению вероятности агрегации частиц ДФ.

Процесс седиментации частиц АШ исследовали гравиметрическим методом с непрерывным взвешиванием кварцевой чашечки, погруженной в суспензию. Кварцевая чашечка была связана с аналитическими весами «Sartorius R200D» с помощью кварцевой нити. Перед началом каждого эксперимента суспензию перемешивали с помощью магнитной мешалки. Седиментационный анализ проводили в статических условиях (рисунок установки показан в работе [28]).

Частицы оседали в стакане диаметром 5 см. Высота оседания частиц H при седиментации составляла 4 см и диаметр кварцевого диска d - 4 см. Замеры проводили во времени с интервалом 1 минута. В результате проведения эксперимента получена зависимость массы оседающих частиц АШ от времени $Q=f(t)$. Для построения относительной седиментационной кривой $Q(\%)=f(t)$ [29, 30] массу частиц АШ, осевших за время t делили на максимальную массу, которая осела за все время эксперимента [28]. Относительные седиментационные кривые позволяют проводить сравнение интенсивности процессов агрегации и седиментации для электролитов с разной концентрацией концентраций АШ.

Максимальную массу частиц АШ, которые могут осесть при условии их полной седиментации, определяли по уравнению [29, 30]:

$$Q_{\max} = H \cdot C \cdot S \cdot \frac{(\rho - \rho_0)}{\rho} \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

где C - концентрация ДФ (АШ), г/л,

S - площадь диска для седиментации, см²,

ρ_0 - плотность цитратного раствора меднения, 1,116 г/см³,

ρ - плотность частиц АШ, 3,5 г/см³ [31],

H - высота столба, оседающей суспензии.

Для расчета скорости седиментации кривую $Q=f(t)$ разбивали на прямолинейные участки, к которым проводили касательные. По проекции касательных на ось ординат определяли массу осевших частиц Q , а по оси абсцисс время. Поскольку линейные участки кривой $Q=f(t)$ характеризуют седиментацию частиц близких по размерам, то точка перегиба кривой будет соответствовать времени оседания частиц данной фракции [28]. Разделив высоту столба седиментации H на время, получим скорость оседания на каждом участке dH/dt .

Об агрегативной устойчивости суспензий АШ в ЦЭМ можно судить по размеру частиц. Абсолютную величину размера частиц определить нельзя, так как их форма не известна, но косвенно о ней можно судить по скорости седиментации суспензии, так как скорость оседания тем больше, чем крупнее частицы.

Результаты и обсуждение

Распределение частиц по размерам в водной суспензии и в суспензии АШ в ЦЭМ проводили на лазерном дифракционном анализаторе. При анализе суспензию АШ разбавляли дистиллированной водой в 10-20 раз. Измерения проводили при непрерывном перемешивании. Кривые на рисунке 1 показывают, что в водной суспензии диаметр частиц АШ изменяется в интервале от 43 до 150 нм. Максимумы для объемного и количественного распределения частиц по размерам соответственно равны 65 и 74 нм. Малое отличие кривых объемного и количественного распределения свидетельствует о том, что форма частиц близка к сферической [17, 24].

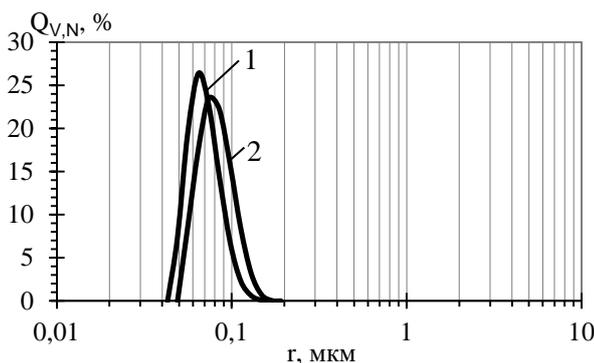


Рис. 1 – Кривая распределения частиц по размерам в исходной суспензии АШ, полученная с помощью лазерного дифракционного анализатора: 1 - объемное распределение, 2 - распределение по количеству

Однако при введении исходной суспензии АШ в цитратный электролит меднения происходит изменение и размеров и формы агрегатов (рис. 2). Количественное распределение частиц по размерам (рисунок 2 кривая 2) указывает на

преимущественное нахождение частиц в растворе ЦЭМ с размерами от 0,34 до 4 мкм. Из кривой объемного распределения частиц по размерам (рис. 2 кр. 1) видно, что в суспензии присутствуют отдельные частицы с размером до 200 мкм. Полученные результаты свидетельствуют о том, что приготовление суспензий АШ в ЦЭМ сопровождается мгновенной агрегацией частиц ДФ, что может быть связано с отличием pH и состава среды. Введение суспензии АШ в электролит с высоким содержанием ионов приводит к сжатию двойного электрического слоя вокруг дисперсных частиц. Кроме того, ионы электролита могут взаимодействовать с функциональными группировками на поверхности дисперсных частиц, нейтрализуя или изменяя их заряд.

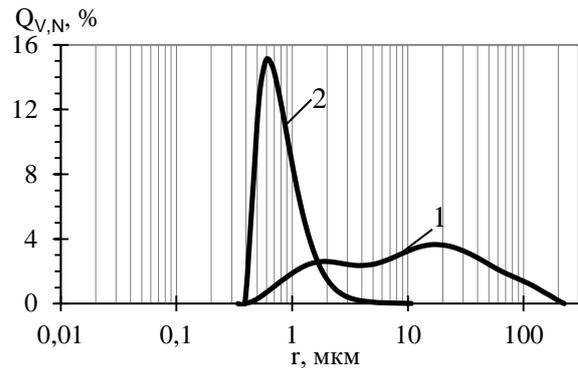


Рис. 2 – Кривая распределения частиц по размерам АШ в ЦЭМ, полученная с помощью лазерного дифракционного анализатора: 1 - объемное распределение, 2 - распределение по количеству

В силу особенностей анализа частиц на дифрактометре (разбавление суспензии и перемешивание) не представлялась возможным оценить размер частиц в статических условиях при заданной концентрации АШ в электролите меднения. В связи с этим были проведены исследования агрегативной и седиментационной устойчивости АШ в ЦЭМ в статических условиях.

На рисунке 3 представлены экспериментальные седиментационные кривые в электролитах меднения с различной концентрацией АШ. При концентрации АШ 0,2 г/л в течение первых 14 минут эксперимента не наблюдалось увеличения массы осевших частиц (рис. 3). Предположили, что в этот период в электролите присутствуют, в основном, частицы малого размера. Эти частицы находятся во взвешенном состоянии и оседают с малой скоростью. Одновременно происходит агрегация мелких частиц и через 14 минут начинается седиментация.

Кривые седиментации, полученные в электролитах с содержанием АШ 0,5 г/л и выше, имеют одинаковый вид. Условно их можно разбить на два линейных участка. Первый участок характеризует быстрое оседание наиболее крупных частиц, а второй участок с малым углом наклона – оседание мелких фракций. Продолжительность первых участков на седиментационных кривых мало

зависит от концентрации АШ в электролите (рис. 3, линия А–А). При этом скорость седиментации тем выше, чем больше концентрация ДФ в электролите. Данный факт может являться косвенным подтверждением того, что с увеличением концентрации АШ в электролите размер агрегатов возрастает. На втором участке скорость седиментации, практически, не зависит от содержания ДФ. Высказанные предположения подтверждает ход седиментационных кривых в относительных координатах (рис. 4).

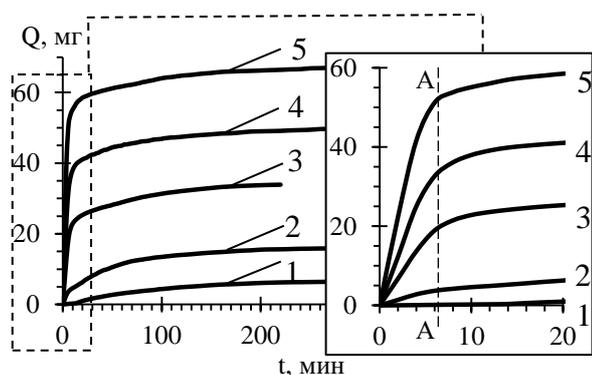


Рис. 3 – Седиментационные кривые при концентрации АШ в ЦЭМ, г/л: 1 - 0,2; 2 - 0,5; 3 - 1,0; 4 - 1,5; 5 - 2,0

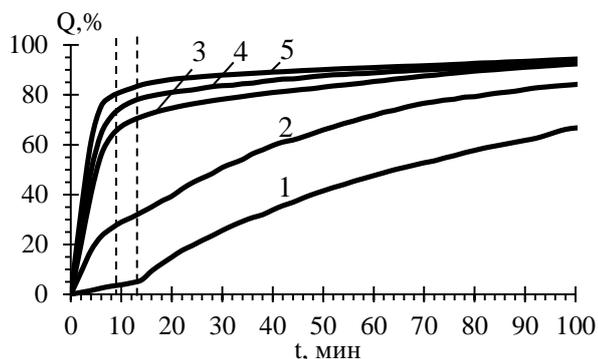


Рис. 4 – Относительные седиментационные кривые в ЦЭМ при концентрации АШ, г/л: 1 - 0,2; 2 - 0,5; 3 - 1,0; 4 - 1,5; 5 - 2,0

Интенсивность седиментации в начальный период возрастает с ростом концентрации АШ (рис. 4). Однако при содержании в суспензии АШ 0,2 и 0,5 г/л, седиментационная устойчивость на втором участке продолжает оставаться высокой, по сравнению с остальными растворами. Это свидетельствует о том, что количество средних и мелких фракций в таких системах больше. При концентрации 1,0 г/л АШ интенсивность седиментации в начальный период ниже, чем при концентрациях 1,5 и 2,0 г/л, следовательно в последних суспензиях количество крупных частиц больше.

На рисунке 5 представлены кривые изменения скорости седиментации во времени. Наибольшие начальные скорости оседания частиц характерны для суспензии с концентрацией ДФ 2,0 г/л (рис. 5).

Резкое снижения скорости седиментации в электролитах с содержанием АШ 2,0 и 1,5 г/л свидетельствует о быстром оседании крупных частиц. Скорость седиментации (рис. 5) в начальный период при концентрации АШ 1,0 г/л оказалась ниже, чем в суспензии, содержащей 0,5 г/л ДФ. Можно предположить, что при повышении концентрации ДФ от 0,5 до 1 г/л не происходит существенного изменения размера частиц, а быстрое оседание частиц на первом участке кривой Q-t (кривая 3 на рис. 4) связано с ростом их количества. Достаточно высокое содержание мелких и средних частиц в электролите с 1,0 г/л АШ, позволит обеспечить равномерное распределение ДФ на поверхности медной матрицы [32].

Постепенно значения скорости седиментации во всех суспензиях уменьшались и по истечению 30 минут были равны между собой (рис. 5).

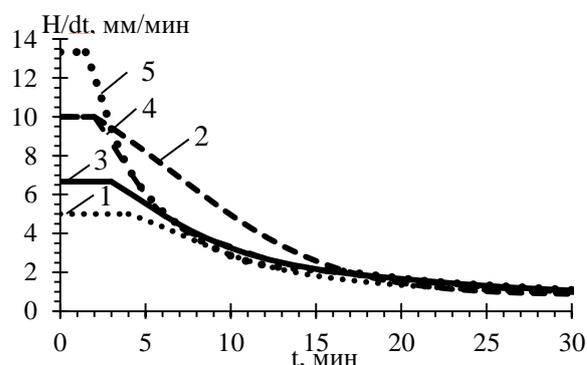


Рис. 5 – Зависимость скорости оседания частиц от время в суспензиях АШ в ЦЭМ, г/л: 1* - 0,2; 2 - 0,5; 3 - 1,0; 4 - 1,5; 5 - 2,0. Кривая 1 представлена после протекания процесса агрегации*

Масса частиц АШ, осевших на кварцевом диске, определяемая в ходе эксперимента, и максимальная масса частиц, рассчитанная по уравнению (1) не совпали. Это может быть связано с тем, что наиболее мелкие фракции АШ остались в электролите во взвешенном состоянии. В связи с этим был исследован цитратный электролит меднения через 5 и 10 дней после завершения седиментации частиц АШ. Аликвоту отбирали из объема электролита над слоем осадка АШ, разбавляли дистиллированной водой и анализировали с помощью лазерного дифракционного анализатора (рис. 6).

Полученные результаты (рис. 6) свидетельствуют о том, что после завершения седиментации в электролите остаются частицы АШ с размером от 20 до 200 нм. Причем, распределение частиц по размерам не меняется и остается постоянным через 5 и 10 суток. Присутствие отдельных частиц с размером около 10 мкм может быть связано со случайным попаданием частиц осадка во время отбора алиquotы.

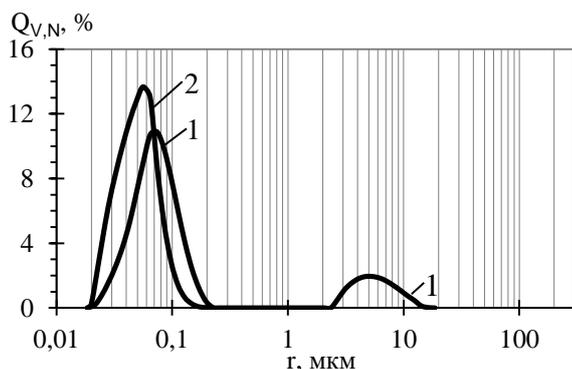


Рис. 6 – Кривые распределения частиц по размерам, полученные с помощью лазерного дифракционного анализатора через 5 и 10 суток после седиментации. 1 - объемное распределение, 2 - распределение по количеству частиц

Проведенные исследования седиментации АШ в электролите меднения полностью согласуются с полученными ранее результатами изучения состава и свойств покрытий [32]. Наилучшей стабильностью обладала суспензия с содержанием 0,2 г/л АШ в ЦЭМ. Однако при низкой концентрации ДФ в электролите (0,2 и 0,5 г/л) не удавалось получить композиционные покрытия с требуемым содержанием алмазных частиц. При концентрации АШ в ЦЭМ более 1,0 г/л происходило образование крупных агрегатов в электролите и протекала интенсивная седиментация агрегатов, что также отрицательно влияло на включение АШ в осадок. Из растворов с различным содержанием АШ были получены композиционные медные покрытия и проведена оценка их эксплуатационных свойств. Увеличение концентрации АШ в ЦЭМ до 1,0 г/л привело к снижению пористости в 3 раза по сравнению с монопокрытием меди, повышению микротвердости и количества вкрапляемых частиц АШ примерно в 2 раза по сравнению с концентрацией 0,2 г/л [32].

Заключение

В ходе работы установлено, что размер частиц в исходной суспензии АШ составлял 43 - 150 нм. При введении суспензии АШ в цитратный электролит меднения происходит агрегация частиц, и размеры их увеличиваются до 0,34 – 4 мкм. Наибольшая агрегативная устойчивость частиц АШ в цитратном электролите меднения наблюдалась при содержании частиц дисперсной фазы 0,2 и 0,5 г/л. Однако электролитов с низким содержанием ДФ не удалось получить композиционных покрытий требуемого состава.

Установлено, что суспензия, содержащая 1,0 г/л АШ, сохраняла значительную долю (количество) мелких и средних частиц в объеме электролита при удовлетворительной седиментационной устойчивости, что позволило получить медные композиционные покрытия с малой пористостью, повышенной износостойкостью и твердостью по сравнению с монопокрытием меди [32].

Выражаем благодарность Поротниковой Наталье Михайловне, кандидату химических наук, сотруднику ИВТЭ Уральского Отделения РАН.

Литература

1. Г.К. Буркат, В.Ю. Долматов, *Физика твердого тела*, **46**, 4, 685–692 (2004).
2. В.И. Целуйкин, Н.Д. Соловьева, *ЖПХ*, **81**, 7, 1106–1107 (2008).
3. С.А. Чулованец, В.И. Парфенов, *ЖПХ*, **80**, 6, 952–955 (2007).
4. А.А. Касач, И.И. Курило, Д.С. Харитонов, С.Л. Радченко, И.М. Жарский. *ЖПХ*, 91, 4, 522–527 (2018).
5. К.И. Тихонов, Г.К. Буркат и др., *ЖПХ*, **80**, 7, 1113–1119 (2007).
6. Пат. РФ 2478739 (2013)
7. Пат. РФ 2585608 (2016)
8. Пат. РФ 2478739 (2013)
9. L. N. Vykhodtseva, A. A. Edigaryan, E. N. Lubnin, Yu. M. Polukarov, V. A. Safonov, *Russian Journal of Electrochemistry*, **40**, 4, 387–393 (2004) - doi 1023-1935/04/4004-0387..
10. G. Valyulene, A. Zhelene, V. Jasulaitene, B. Shimkunaite, *Russian Journal of Applied Chemistry*, **80**, 8, 1322–1326(2007) – DOI: 10.1134/S1070427207080113
11. В.Н. Целуйкин, А.А. Корешкова, О.Г. Неверная, Г.В. Целуйкина, Н.Д. Соловьева *Конденсированные среды и межфазные границы*, **14**, 4, 496–499.
12. Y. Tong, S. Bohmb, M. Song, *Austin J Nanomed Nanotechnol*, **1**, 1, 1–16 (2013).
13. Е.А. Беленков, В.В. Ивановская, А.Л. Ивановский, *Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. Компьютерное материаловедение*. УрО РАН, Екатеринбург, 2008. 169 с.
14. В.Ю. Долматов, *Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение*. НПО «Профессионал», СПб, 2011. 536 с.
15. V.N. Mochalin, O. Shenderova, D. Ho and Yu. Gogotsi. *Nature nanotechnology*, **7**, 11–23 (2012) - doi: 10.1038/nnano.2011.209.
16. V. Yu. Dolmatov, I. I. Kulakova, V. Myllymäki, A. Vehanen, A. N. Panova, and A.A. Voznyakovskii, *Journal of Superhard Materials*, **36**, 5, 344–357 (2014).
17. М.Д. Шарков, М.Е. Бойко, С.Н. Ивашевская, С.Г. Конников, *Физика твердого тела*, **56**,11, 2265–2268 (2014).
18. М.К. Беданов, М.А. Меретуков, Р.А. Тороян. *Новые Технологии*, 1, 10–14 (2013)
19. Г.Д. Ильницкая, Н.А. Олейник, И.Н. Зайцева, В.В. Тимошенко, *НАУКОВИ НОТАТКИ: межвузовский сборник статей*, **41**, 1, 106–112 (2013).
20. Пат. РФ № 2478739 (2013)
21. Пат. РФ 2202007 (2003).
22. Пат. РФ 2283373 (2006).
23. А.А. Kasach, I.I. Kurilo, D.S. Haritonov, S.L. Radchenko, I.M. Zharskij. *Russian Journal of Applied Chemistry*, **91**, 2, 207–213 (2018).
24. C. Weiwei, P. Xuefeng, Ch. Xiaoqin, W. Xi, J. Feng, L. Qiang, Ch. Huinan, J. Chao, Y. Zhiwen, X. Xiaodong, *J Mater Sci*, 2016. DOI 10.1007/s10853-016-0475-6.
25. В.В. Яскельчик, И.М. Жарский, Г.К. Буркат, А.А. Черник, Е.В. Михедова, *Изв. Санкт-Петерб. гос. технол. ин-та*, **28** (54), 25–28 (2015).
26. Пат. РБ № 21667 (2016).
27. Mastersizer 2000 User Manual - https://www2.warwick.ac.uk/fac/cross_fac/sciencicity/

- programmes/internal/themes/am2/booking/particlesize/mast
ersizer_2000_main_manual.pdf_дата доступа: 20.12.2017.
28. В.В. Яскељчык, М.В. Ананьев, Т.Н. Останина, Н.И. Останин, И.М. Жарский, А.А. Черник, *Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия*, **4**, 53–61 (2017). DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2017-4-53-61.
29. И.И. Михаленко, *Лабораторный практикум по коллоидной химии. Российский университет дружбы народов*, Москва, 2013. 125 с.
30. В.Ф. Марков, Л.Н. Маскаева, *Основы коллоидной химии*. УрФУ, Екатеринбург, 2011. 203 с.
31. А.М. Schrand, S.A.C. Hens, O.A. Shenderov, *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, **34**, 1–2, 18–74 (2009).
32. В.В. Яскељчык, И.М. Жарский, Е.В. Михедова, А.А. Черник. *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук*. **54**, № 1, 24–31 (2018).

© **В. В. Яскељчык** – аспирант кафедры химии, технологии электрохимических производств и материалов электронной техники (Х,ТЭХПиМЭТ) УО «Белорусского государственного технологического университета» (УО «БГТУ») (220030 г. Минск, ул. Свердлова, 13а). E-mail: yaskelchyk@gmail.com; **М. В. Ананьев** – канд. хим. наук, доцент Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН (ИВТЭ УрО РАН) (620137 г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20), доцент кафедры технологии электрохимических производств (ТЭП) ФГАОУ ВО «Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ) (620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: m.ananyev@mail.ru; **И. М. Жарский** – канд. хим. наук, профессор кафедры Х,ТЭХПиМЭТ БГТУ (220030 г. Минск, ул. Свердлова, 13а). E-mail: root@belstu.by; **Т. Н. Останина** – докт. хим. наук, профессор кафедры ТЭП УрФУ (620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: t.n.ostanina@urfu.ru; **Н. И. Останин** – канд. хим. наук, доцент кафедры ТЭП УрФУ (620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19). E-mail: ostni@mail.ru; **А. А. Черник** – канд. хим. наук, доцент, зав. кафедрой Х,ТЭХПиМЭТ БГТУ (220030 г. Минск, ул. Свердлова, 13а). E-mail: alexachernik@belstu.by.

© **V. V. Yaskelchyk** – Post-Graduate Student, Department of Chemistry, Technology of Electrochemical Productions and Materials of Electronic Technique (Ch,TEChP&MET), EE «Belarusian State Technological University» (BSTU) (220030 Minsk, st. Sverdlova, 13a). E-mail: yaskelchyk@gmail.com; **M. V. Ananyev** – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, the Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (ИНТЕ УрВ RAS) (620137 Yekaterinburg, st. Akademicheskaya, 20), Associate Professor, Department of Technology of Electrochemical Productions (TEP), Ural Federal University (UrFU) (620002 Yekaterinburg, st. Mira, 19). E-mail: m.ananyev@mail.ru; **I. M. Zharskiy** – Cand. Sci. (Chem.), Prof., Department Ch,TEChP&MET, BSTU (220030 Minsk, st. Sverdlova, 13a). E-mail: root@belstu.by; **T. N. Ostanina** – Dr. Sci. (Chem.), Prof., Department TEP, UrFU (620002 Yekaterinburg, st. Mira, 19). E-mail: t.n.ostanina@urfu.ru; **H. I. Ostanin** – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department TEP, UrFU (620002 Yekaterinburg, st. Mira, 19). E-mail: ostni@mail.ru; **A. A. Chernik** – Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Head, Department Ch,TEChP&MET, BSTU (220030 Minsk, st. Sverdlova, 13a). E-mail: alexachernik@belstu.by.