СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМ СВЕРХТВЕРДЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Гадалов В.Н.¹, Серебровский В.В.¹, Щеренкова И.С.², Абакумов А.В.¹, Тураева О.А.¹

¹ Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

² Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация

Постановка задачи: в работе рассмотрен метод увеличения стойкости электролитического хрома. **Цель работы:** создание комплексных электрохимических покрытий (КЭП). **Используемые методы:** технология нанесения комплексных электрохимических покрытий заключается в соосаждении металлической основы и упрочняющих дисперсных частиц второй фазы. Применение в качестве упрочнителей сверхтвердых материалов (ультрадисперсный алмаз (УДА) и вюрцитоподобный нитрил бора (γ -BN)) позволяет получать комплексные электрохимические покрытия на основе хрома с высокой твердостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения, что увеличивает срок службы детали. **Новизна:** представлены комплексные электрохимические покрытия толщиной до 100 мкм, обладающие малой трещиноватостью, высокой твердостью и износостойкостью для увеличения срока службы инструментов, использующихся в условиях повышенных нагрузок и износа, в частности для дисковых ножей для резки листового металла, подвергающихся перезатачиванию в процессе эксплуатации. **Результаты:** установлено, что в хромовые покрытия легче всего внедряются частицы УДА размером до 70 нм, а преимущественный размер частиц нитрида бора составляет 0,5–1 мкм. Показано, что дисперсный наполнитель УДА (6–70 нм) эффективнее повышает эксплуатационные характеристики в покрытиях толщиной до 50 мкм, а наполнитель из более крупного порошка нитрида бора 0,1–10 мкм – в покрытиях толщиной 60–150 мкм. Наночастицы УДА легче внедряются в тонкое покрытие, измельчая кристаллиты хрома. Уменьшение влияния водорода с течением времени способствует внедрению крупных упрочняющих частиц, в частности микрочастиц порошка нитрида бора. Установлено, что повышенной износостойкостью обладают поликомпозиционные покрытия с наполнителем, состоящим из частиц УДА и γ -BN. Совместное воздействие частиц УДА и вюрцитоподобного нитрида бора приводит к повышению износостойкости покрытий в 4 раза по сравнению с покрытием из электролитического хрома без добавок. **Практическая значимость:** применение в качестве упрочнителей сверхтвердых материалов (ультрадисперсный алмаз (УДА) и вюрцитоподобный нитрил бора (γ -BN)) позволяет получать комплексные электрохимические покрытия на основе хрома с высокой твердостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения, что увеличивает срок службы детали [1–5].

Ключевые слова: электрохимические покрытия, износостойкость, микроструктура, металлографические исследования, дисперсный наполнитель.

Введение

Одним из перспективных методов увеличения стойкости электролитического хрома является создание комплексных электрохимических покрытий (КЭП). Технология нанесения комплексных электрохимических покрытий заключается в соосаждении металлической основы и упрочняющих дисперсных частиц второй фазы. Применение в качестве упрочнителей сверхтвердых материалов (ультрадисперсный алмаз (УДА) и вюрцитоподобный нитрил бора (γ -BN)) позволяет получать комплексные электрохимические покрытия на основе хрома с высокой твердостью, износостойкостью и

низким коэффициентом трения, что увеличивает срок службы детали [1–5].

Настоящая работа посвящена разработке комплексных электрохимических покрытий толщиной до 100 мкм, обладающих малой трещиноватостью, высокими твердостью и износостойкостью для увеличения срока службы инструментов, использующихся в условиях повышенных нагрузок и износа, в частности дисковых ножей для резки листового металла, подвергающихся перезатачиванию в процессе эксплуатации.

Ниже представлены результаты исследований влияния частиц ультрадисперсного алмаза на структуру и свойства формирующихся комплексных электрохимических покрытий на основе хрома.

© Гадалов В.Н., Серебровский В.В., Щеренкова И.С., Абакумов А.В., Тураева О.А., 2016

Материалы и методы исследований

Алмазный порошок, использованный при нанесении покрытий, получался методом детонационного синтеза. Рентгеновским качественным анализом установлено, что, кроме алмазной составляющей, в порошке присутствует графит.

Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии показали, что порошок ультрадисперсного алмаза представляет собой преимущественно частицы сферической формы с размерами в интервале от 4 до 100 нм, которые, в основном, находятся в агломерированных скоплениях размером до 800 нм.

Концентрация ультрадисперсного алмаза в электролите является одним из важнейших параметров процесса нанесения комплексных электрохимических покрытий, определяющих его свойства. Для определения оптимальной концентрации ультрадисперсного алмаза в электролите при нанесении комплексных электрохимических покрытий исследования структуры и свойств покрытия проводились на образцах с покрытиями толщиной 50 мкм, нанесёнными в электролите с концентрацией ультрадисперсного алмаза 10, 15, 20 и 42 г/л. Установлено, что сочетание высокой микротвёрдости поверхности покрытий и максимальной износостойкости при абразивном износе без смазки наблюдается у комплексных электрохимических покрытий с концентрацией УДА 20 г/л (табл. 1).

Таблица 1

Износостойкость комплексных электрохимических покрытий с различным содержанием УДА

Концентрация УДА в электролите, г/л	0	10	15	20	42
Убыль веса, %	1,08	0,73	0,67	0,5	0,81
Относительная износостойкость $K_{и'} = I_{кэп}/I_{сг}$	1,00	1,47	1,77	2,29	1,45
Толщина износившегося слоя покрытия, мкм	45	37	30	24	38
Микротвёрдость поверхности, ГПа	7,90	8,55	9,30	11,31	11,51

При увеличении концентрации частиц ультрадисперсного алмаза в электролите с 20 до 42 г/л микротвёрдость не изменяется, но происходит падение износостойкости, что связано с охрупчиванием покрытий, в частности, из-за зарождения микротрещин около внедрённых в покрытие частиц, которые являются центрами концентрации внутренних напряжений.

Твёрдый электролитический хром склонен к развитию трещин из-за внутренних напряжений, а покрытия с толщиной более 30–40 мкм обладают большим количеством трещин и пор, что делает покрытие рыхлым и уменьшает эксплуатационные свойства. С целью изучения влияния толщины КЭП с УДА на их качество были сформированы покрытия толщиной 15–130 мкм при концентрации УДА в электролите 20 г/л.

Установлено, что добавление частиц ультрадисперсного алмаза в электролит способствует формированию равномерных сплошных и плотных комплексных электрохимических покрытий без видимых дефектов (трещин, пор). Поверхность комплексных электрохимических покрытий с добавлением УДА обладает сильно развитой поверхностью, состоящей из мелких «червеобразных» кристаллитов хрома длиной 5–15 мкм и шириной 1–2 мкм. Измерения шероховатости поверхности покрытий показали, что происходит снижение шероховатости при введении УДА (у хромового покрытия бездобавок: R_z (высота неровности профиля по десяти точкам) – 421,7 нм, показатель R_a (среднее арифметическое отклонение профиля) – 55,9 нм, а максимальная высота у пиков R_{max} – 847,7 нм; у образца с добавлением 20 г/л УДА: R_z – 176,9 нм, R_a – 25,1 нм, а R_{max} – 356,1 нм).

При формировании комплексных электрохимических покрытий мелкодисперсные частицы адсорбируются на растущих кристаллах, прекращая их рост и становясь центрами кристаллизации для последующих кристаллитов хрома, что приводит к измельчению, а также снижению пористости в формирующемся покрытии. Микроструктура покрытий с УДА характеризуется относительной однородностью кристаллитов по сечению (рис. 1).

При изучении размера, количества и распределения частиц УДА в покрытии методом электронной микроскопии на экстракционных угольных репликах установлено, что средний размер включений наноалмаза в покрытии составляет 32 нм, средняя плотность распределения включений в комплексных электрохимических покрытиях равна $2,7 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. Около 80% включений имеют размеры менее 60 нм. На основании полученных результатов установлено, что объемная доля ультрадисперсного алмаза составляет 0,4%, а массовая – 0,2%.

а

б

Рис. 1. Микроструктура сечения хромовых покрытий толщиной 90–95 мкм:
а – электролитический без добавок;
б – с включениями УДА

При измерении микротвёрдости поверхности комплексных электрохимических покрытий с добавлением частиц ультрадисперсного алмаза установлено, что при увеличении толщины 25–50 мкм микротвёрдость поверхности покрытий статистически значимо не различается. Увеличение толщины покрытия до 100 мкм приводит к снижению микротвёрдости на $\approx 30\%$. Наибольшее снижение микротвёрдости по сечению покрытий (до 50%) также наблюдается в покрытиях толщиной 100 мкм.

Испытания на абразивный износ по схеме сухого трения образцов КЭП с УДА разных толщин показали, что максимальной износостойкостью обладают покрытия толщиной 50 мкм. Износостойкость этих покрытий в 2,46 раза выше по сравнению с покрытиями из чистого электролитического хрома. Характеристики механических свойств для различных толщин КЭП с УДА приведены в табл. 2.

Таблица 2

Износостойкость КЭП с УДА различных толщин

Толщина КЭП, мкм	25	50	100
Убыль веса, %	0,96	0,48	0,58
Относительная износостойкость $K_{И'} = I_{КЭП} / I_{Cr}$	1,23	2,46	2
Толщина износившегося слоя покрытия, мкм	24	35	43
Микротвёрдость поверхности, ГПа	12,25	11,31	8,07

Проведённые эксперименты позволили установить оптимальные параметры наносимого комплексного электрохимического покрытия на основе хрома с добавлением УДА. Наилучшие эксплуатационные показатели были у КЭП толщиной 40–50 мкм с концентрацией УДА в электролите 20 г/л.

На основании полученных данных и результатов определения износостойкости в условиях испытаний, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации режущего инструмента, была выбрана схема упрочнения режущей кромки дисковых ножей, применяющихся для резки листового проката. Комплексные электрохимические покрытия с УДА наносились на торцевую сторону дискового ножа. После промышленных испытаний было отмечено увеличение рабочего ресурса, отсутствие выкрашивания кромок и снижение количества перешлифовок ножей.

В комплексных электрохимических покрытиях с ультрадисперсным алмазом происходит увеличение твёрдости и износостойкости до толщины покрытия 50 мкм, а в дальнейшем наблюдается спад этих характеристик. Вюрцитоподобная модификация нитрида бора (γ -BN), так же как и ультрадисперсный алмаз, относится к классу сверхтвёрдых материалов, следовательно, его присутствие в КЭП способствует повышению микротвёрдости и износостойкости. В связи с этим были проведены исследования возможности формирования КЭП с γ -BN толщиной более 60 мкм с высокими эксплуатационными характеристиками.

Рентгеновским качественным фазовым анализом и методом электронной микроскопии установлено, что порошок нитрида бора, использованный при нанесении покрытий, представляет собой плотную гексагональную вюрцитоподобную модификацию γ -BN. Частицы вюрцитоподобного нитрида бора имеют вид гладких пластин с острыми краями размером от

0,1 до 100 мкм и толщиной менее 0,1 мкм.

Толщина сформированных комплексных электрохимических покрытий изменялась в диапазоне 50–130 мкм. Покрытия имели равномерную толщину с отсутствием видимых дефектов (трещин, пор), присущую чистым электролитическим покрытиям при тех же толщинах.

Исследования поверхностей комплексных электрохимических покрытий с γ -BN, проведенные на растровом электронном микроскопе JEOL 638LV, показали, что введение в электролит микропорошка нитрида бора в основном приводит к снижению количества трещин и шероховатости поверхности. Так, в образцах с комплексным электрохимическим покрытием R_z – 63,0 нм, R_a – 5,2 нм, R_{max} – 122,8 нм, в образцах с покрытием из хрома без добавок R_z – 421,7 нм, R_a – 55,9 нм, R_{max} – 847,7 нм. При этом морфология поверхности КЭП сходна с морфологией чистого электролитического хрома.

После сравнения микроструктур покрытия с чистым хромом, комплексные электрохимические покрытия с УДА (см. **рис. 1**) и комплексные электрохимические покрытия с γ -BN (**рис. 2**) можно заключить, что размер кристаллитов в покрытии с частицами нитрида бора крупнее, чем с частицами наноалмаза. Предположительно это объясняется тем, что более крупные частицы γ -BN способствуют меньшему измельчению кристаллов хрома при осаждении.

При изучении размера, количества и распределения частиц γ -BN в покрытии методом электронной микроскопии на экстракционных угольных репликах установлено, что средний размер включений γ -BN в покрытии составляет 1,14 мкм, средняя плотность распределения включений в комплексных электрохимических покрытиях равна $4,4 \cdot 10^6 \text{ см}^2$. Около 65% включений имеют размер до 1 мкм.

Измерение микротвёрдости покрытий толщиной от 40 до 100 мкм показало, что покрытия на поверхности имеют практически одинаковую микротвёрдость 10–12 ГПа. При этом отмечается снижение микротвёрдости по сечению у покрытий толщиной 40 и 50 мкм, а у КЭП толщиной 70 и 100 мкм микротвёрдость имеет более высокое значение по глубине. Испытания на износостойкость комплексных электрохимических покрытий с γ -BN проводились в условиях абразивного изнашивания. Относительная износостойкость (K_n') комплексных электрохимических покрытий с γ -BN толщиной менее 50 мкм сопоставима с износостойкостью чисто хромовых осад-

ков и составляет 1,04. У покрытий толщиной 90–100 мкм наблюдается увеличение износостойкости ($K_n' = 1,43$). Поэтому можно предположить, что комплексные электрохимические покрытия с γ -BN толщиной более 70 мкм будут дольше сохранять свои эксплуатационные свойства по мере истирания покрытий.

а

б

Рис. 2. Микроструктура сечения покрытий, $\times 1000$: а – электролитический хром без добавок; б – комплексные электрохимические покрытия с включениями γ -BN (толщина покрытий 90–95 мкм)

Сравнение экспериментальных данных, проведенных на комплексных электрохимических покрытиях с наноалмазом и с γ -BN, позволяет сделать вывод, что в большей степени толщина покрытий оказывает влияние на комплексные электрохимические покрытия с γ -BN. Полученный результат объясняется тем, что при электрокристаллизации с хромом легче соосаждаются мелкие частицы. Но на покрытиях с толщиной менее 40 мкм проявляется отрицательное влияние водорода.

При толщинах КЭП свыше 60 мкм увеличивается количество трещин и пор в покрытии, что

может создать более благоприятные условия для закрепления частиц и тем самым увеличить их концентрацию в покрытии. Также внедрению частиц γ -BN в более толстые покрытия способствует уменьшение с течением времени выделения водорода, препятствующего внедрению. Недостатком КЭП с γ -BN является неравномерное упрочнение по толщине покрытия вследствие сосредоточения частиц γ -BN в поверхностных зонах.

Ниже представлены исследования влияния совместного введения ультрадисперсного алмаза и нитрида бора на структуру и механические свойства комплексных электрохимических покрытий. Результаты предыдущих исследований показали, что УДА целесообразно применять при нанесении комплексных электрохимических покрытий толщиной до 60 мкм, а нитрид бора – в комплексных электрохимических покрытиях толщиной свыше 50 мкм. Поэтому при формировании покрытий толщиной 100 мкм и более существенно улучшить качество КЭП можно, используя совместное соосаждение частиц УДА и γ -BN из электролита, т.е. получение поликомпозиционного электрохимического покрытия (ПКЭП). Исходя из этого, из электролита с двумя видами наполнителя (УДА и γ -BN) формировались комплексные электрохимические покрытия различных толщин. Концентрация УДА в электролите составляла 20 г/л, нитрида бора – 50 г/л, прочие параметры нанесения остались без изменения. Первую группу составили ПКЭП с покрытиями толщиной 50–90 мкм, во вторую группу входили образцы с покрытиями от 90 до 130 мкм.

Проведенные металлографические исследования ПКЭП разных толщин показали различие структур сформированных покрытий. Структура ПКЭП первой группы является однородной мелкокристаллической (рис. 3, а). В микроструктуре поликомпозиционных электрохимических покрытий, полученных из комплексного электролита второй группы (рис. 3, б), выявляются два явно различимых слоя: первый (примыкающий к основе) – с весьма мелкодисперсными кристаллитами хрома, второй – с наличием кристаллитов хрома разных размеров, в том числе и с достаточно крупными.

По результатам исследований экстракционных реплик, полученных с обоих слоев, установлено, что первый слой по структуре аналогичен КЭП с УДА, в нём обнаруживаются только весьма мелкие включения размером до 40 нм. Средний размер включений УДА в ПКЭП со-

ставляет 30,0 им, средняя плотность включений $-2,7 \cdot 10^9 \text{ см}^2$. Объёмная доля УДА равна 0,2%, а массовая – 0,1%.

×1250 (×2)

×1250

Рис. 3. Микроструктура образца с ПКЭП на основе хрома с комплексным наполнителем: а – первая группа; б – вторая группа

В верхнем слое наряду с внедрёнными частицами УДА наблюдаются крупные частицы γ -BN. Средний размер частиц составил 580 нм, плотность распределения – $2,2 \cdot 10^7 \text{ см}^2$. Объёмная доля γ -BN в покрытии равна 0,2%, а массовая – 0,1%.

Таким образом, установлено, что при совместном осаждении частиц УДА и γ -BN на более ранних стадиях процесса будет происходить внедрение наноразмерного порошка УДА, сильно измельчающее кристаллиты хрома. При толщинах более 50–70 мкм начнётся массовое внедрение частиц нитрида бора.

Результаты измерения микротвердости поликомпозиционных покрытий показали, что максимальную твердость (11,5 ГПа) имеет покрытие Cr + γ -BN/ УДА толщиной 115 мкм. ПКЭП из первой группы имели твердость 9,0–9,5 ГПа. Из-

носостойкость поликомпозиционных электрохимических покрытий существенно повышается с ростом толщины, итносительная износостойкость (K_n') ПКЭП первой группы составила 1,45; у ПКЭП второй группы $K_n' = 4$ [3].

В дальнейшем были проведены исследования более толстых электрохимических покрытий 250–300 мкм упрочняющими частицами γ -BN. Изучение микроструктуры этих КЭП выявило наличие большого количества трещин. Таким образом, наряду с другими факторами, влияющими на износостойкость, необходимо оптимизировать толщину покрытия.

Выводы

1. Для получения в саморегулирующемся электролите сульфатного типа хромовых композиционных электрохимических покрытий с высокими эксплуатационными свойствами при режиме нанесения с температурой электролита 60°C и плотностью тока 50 А/дм² можно рекомендовать концентрацию добавки УДА в электролит в размере 20 г/л.

2. Установлено, что в хромовые покрытия легче всего внедряются частицы УДА размером до 70 нм, а преимущественный размер частиц нитрида бора составляет 0,5–1 мкм.

3. Показано, что дисперсный наполнитель УДА 6–70 нм эффективнее повышает эксплуатационные характеристики в покрытиях толщиной до 50 мкм, а наполнитель из более крупного порошка нитрида бора 0,1–10 мкм – в покрытиях толщиной 60–150 мкм. Наночастицы УДА легче внедряются в тонкое покрытие, измельчая кри-

сталлиты хрома. Уменьшение влияния водорода с течением времени способствует внедрению крупных упрочняющих частиц, в частности микрочастиц порошка нитрида бора.

4. Установлено, что повышенной износостойкостью обладают поликомпозиционные покрытия с наполнителем, состоящим из частиц УДА и γ -BN. Совместное воздействие частиц УДА и вюрцитоподобного нитрида бора приводит к повышению износостойкости покрытий в 4 раза по сравнению с покрытием из электролитического хрома без добавок.

Вышеприведенные исследования не противоречат экспериментальным данным, полученным ранее и опубликованным в наших работах [1–3].

Список литературы

1. Химико-термическая, электрофизическая обработка металлов, сплавов и гальванических покрытий: монография / Гадалов В.Н., Петренко В.Р., Пешков В.В., Сафонов С.В. М.: АРГАМАК – МЕДИА, 2013. 320 с.
2. Получение износостойких хромовых покрытий с применением нанолмазов, различной породы / В.Ю. Долматов, Т. Фуджимура, Г.К. Буркат [и др.] // Сверхтвердые материалы. 2002. №6. С. 16–20.
3. Буркат Г.К., Долматов В.Ю. Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике // Физика твердого тела. 2004. Т.46. №4. С. 685–692.
4. Электролитические железофосфорные композитные покрытия с наполнителем из карбида вольфрама / В.Н. Гадалов, А.Н. Гончаров, С.Б. Григорьев [и др.] // Актуальные проблемы химической науки, практики и образования. Курск: КГТУ, 2009. Ч. 2. С. 25–27.
5. Шкатов В.В., Шатов Ю.С., Шеренкова И.С. Влияние дисперсных сверхтвердых частиц на морфологию поверхности и эксплуатационные свойства электролитических хромовых покрытий // Конденсированные среды и межфазные границы. 2013. Т. 15. №2. С. 111–115.

Материал поступил в редакцию 08.09.15.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-3-39-45

THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTROPLATED CHROMIUM COATINGS WITH AN ULTRAFINE SUPERHARD FILLER

Vladimir N. Gadalog – D.Sc. (Eng.), Professor
Southwest State University, Kursk, Russia. E-mail: Gadalog-vn@yandex.ru

Vadim V. Serebrovsky – D.Sc. (Eng.), Professor
Southwest State University, Kursk, Russia. E-mail: sv1111.sv1111@gmail.com

Irina S. Cherenkova – Ph.D. (Eng.), Assistant Professor
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia. E-mail: mailbox@stu.lipetsk.ru

Andrey V. Abakumov – Postgraduate Student
Southwest State University, Kursk, Russia. E-mail: 747-067@mail.ru

Olga A. Turaeva – Postgraduate Student
Southwest State University, Kursk, Russia. E-mail: swsu.ee@gmail.com

Abstract

Problem Statement (Relevance): This paper discusses a method of increasing the resistance of electrolytic chromium. **Objectives:** The study is aimed at creating integrated electrochemical coatings. **Methods Applied:** The integrated electrochemical coating technology involves a coprecipitation of the metallic substrate and strengthening dispersion second-phase particles. The use of superhard materials, such as ultra-dispersed diamonds (UDD) and wurtzite-like boron nitride (γ -BN), as strengthening elements provides high-hardness, high-wear-resistance and low-friction integrated chromium coatings ensuring a longer part life. **Originality:** The article describes integrated electrochemical coatings with the thicknesses of up to 100 microns which have low fracture, high hardness and high wear resistance aimed at extending the service life of tools operating under severe load and wear conditions. This, in particular, refers to knife disks used for cutting sheet metal which have to be resharpened during the normal operation. **Findings:** The authors found that the UDD particles of up to 70 nm have the best penetration with regard to chromium coatings, with the predominant size of the boron nitride particles of 0.5 to 1 micron. The study shows that the UDD filler (6-70 nm) works more efficiently in coatings with the thickness of up to 50 microns, while the boron nitride filler, which is a coarser powder 0.1 to 10 microns in size, is more efficient in coatings with the thickness of 60 to 150 microns. The UDD nanoparticles show a better penetration in thin coatings producing a finer chromium crystalline structure. The gradual reduction of the hydrogen effect facilitates the integration of coarser strengthening particles, in particular the boron nitride microparticles. It was found that complex coatings comprising both UDD and γ -BN fillers offer a higher wear resistance. The combined effect of

UDD particles and wurtzite-like boron nitride provides a 4-time increase in wear resistance compared with additive-free chromium coatings. **Practical Relevance:** The use of superhard materials, such as ultra-dispersed diamonds (UDD) and wurtzite-like boron nitride (γ -BN), as strengthening elements provides high-hardness, high-wear-resistance and low-friction integrated chromium coatings ensuring a longer part life [1-5].

Keywords: Electrochemical coatings, wear resistance, microstructure, metallographic tests, particulate filler.

References

1. Gadalog V.N., Petrenko V.R., Peshkov V.V., Safonov S.V. *Khimiko-termicheskaya, elektrofizicheskaya obrabotka metallov, spлавov i galvanicheskikh pokrytii: monografiya* [Thermochemical treatment and electrophysical machining of metals, alloys and galvanic coatings: Monograph]. Moscow: ARGAMAK – MEDIA, 2013, 320 p. (In Russ.)
2. Dolmatov V.Yu., T. Fujimura, Burkat G.K. et al. Obtaining wear-resistant chromium coatings with the help of different kinds of nanodiamonds. *Sverkhтвердые материалы* [Superhard materials]. 2002, no. 6, pp. 16-20. (In Russ.)
3. Burkat G.K., Dolmatov V.Yu. Ultradispersed diamonds in the electroplating process. *Fizika tverdogo tela* [Solid state physics], 2004, vol. 46, no. 4, pp. 685-692. (In Russ.)
4. Gadalog V.N., Goncharov A.N., Grigoriev S.B. [et al.] Fe-P composite coatings with the tungsten carbide filler. *Aktual'nye problem khimicheskoi nauki, praktiki i obrazovaniya* [Urgent problems of the chemical science, practice and education]. Kursk: KSTU, 2009, part 2, pp. 25-27. (In Russ.)
5. Shkatov V.V., Shatov Yu.S., Sherenkova I.S. The effect of dispersion superhard particles on the surface morphology and performance characteristics of electrolytic chromium coatings [text]. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy* [Condensed matters and interphase boundaries], 2013, vol.15, no. 2, pp. 111-115. (In Russ.)

Received 08/09/15

Структура и свойства электролитических хромовых покрытий с ультрадисперсным сверхтвердым наполнителем / Гадалов В.Н., Серебровский В.В., Шеренкова И.С., Абакумов А.В., Тураева О.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №3. С. 39–45. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-39-45

Gadalog V.N., Serebrovsky V.V., Cherenkova I.S., Abakumov A.V., Turaeva O.A. The structure and properties of electroplated chromium coatings with an ultrafine superhard filler. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016, vol. 14, no. 3, pp. 39–45. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-3-39-45