

Влияние наноразмерных частиц оксида алюминия на структуру и физико-механические свойства хромовых покрытий

В. В. Сафонов^а, С. А. Шишурин^а, В. С. Сёмочкин^а, А. М. Захаревич^б

^аФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова»,

Театральная пл., 1, г. Саратов, 410012, Россия, e-mail: nirmsgau@mail.ru

^бФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского», ул. Астраханская, 83, г. Саратов, Россия, 410012, e-mail: lab-15@mail.ru

Представлены результаты исследования структуры, химического состава и основных служебных свойств нанокomпозиционных гальванических покрытий хрома. Определена нанодисперсная фаза, позволяющая увеличить микротвердость, износостойкость и коррозионную стойкость получаемых покрытий. Установлено процентное содержание основных химических элементов нанокomпозиционного гальванического покрытия на основе хрома.

Ключевые слова: нанокomпозиционные покрытия, гальванические покрытия, нанодисперсные материалы, микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость.

УДК 621.9.047.7

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно развивается технология получения композиционных гальванических покрытий. Ее особенностью является то, что вместе с металлом из гальванической ванны на детали осаждаются дисперсные частицы, волокна и усы различных карбидов, боридов, оксидов, сульфидов, порошков полимеров и т.д. Включение дисперсных материалов в металлическую матрицу значительно изменяет свойства получаемых покрытий [1–3]. Они могут совмещать в себе характеристики электролитически осажденных металлов (электро- и теплопроводность, износостойкость, пластичность и др.), а также металлов и неметаллов (жаростойкость, химическая стойкость, твердость и др.), которые могут включаться в осадок при наложении поляризирующего тока.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для объяснения механизма упрочнения композиционных покрытий основной теоретической базой является теория дислокаций и препятствий. Хорошо известно, что особые дефекты, называемые дислокациями, присутствуют почти во всех кристаллах. Усилия, приложенные к кристаллической решетке, вызывают движение дислокаций. Препятствия, находящиеся на пути движения дислокаций, требуют приложения дополнительных нагрузок для дальнейшего продвижения дислокаций, способствуя повышению сопротивляемости материала внешним нагрузкам. Эффективными барьерами для движения дислокаций могут быть сравнительно равномерно распределенные в катодном осадке нанодисперсные частицы. Включение в осадок нано-

дисперсных частиц нарушает упорядочение роста его кристаллов. При встрече с частицами скользящие дислокации будут огибать препятствия и оставлять на них замкнутые петли. Если между частицами пройдут и другие дислокации, то они оставят вокруг частицы новые петли большего размера. Прохождение последующих дислокаций между частицами в большей степени будет затруднено, таким образом повысится плотность дислокаций и произойдет упрочнение покрытия.

Частицы играют в покрытии роль барьеров, препятствующих выходу дислокаций на поверхность осадка и снижению плотности дислокаций [3–5].

Около каждой частицы образуется поле определенного напряженного состояния материала матрицы. Вследствие этого на поверхности осадка возникают зоны, характеризующиеся различной способностью к обратимой микропластической деформации, а при износе поверхностных слоев обнажаются все новые слои высокой микротвердости. При равномерном распределении частиц в покрытии образуется своеобразный регулярный микрорельеф по всей его толщине. Это принципиально отличает получаемое композиционное покрытие от традиционных методов упрочнения деталей, таких как химико-термический, термический и др., при которых микротвердость снижается по мере износа твердых поверхностных слоев.

На упрочнение электролитического осадка влияет также контакт частиц с осадком, приводящий к эффекту наклепа [1, 5]. Таким образом, наличие частиц в электролите и их контакт с катодом, даже без включения в покрытие, приводят к упрочнению металла вследствие того,

что частицы, внедряясь в осаждаемый металл или контактируя с его поверхностью, искажают формирующуюся кристаллическую решетку и образуют дефекты.

Анализ литературных данных показал, что в качестве упрочнителей применяют частицы, волокна и усы различных материалов с размерами от 200 нм и более [3, 5, 7]. Зарастивание дисперсных материалов с такими размерами осаждаемым металлом затруднено из-за высокой скорости седиментации частиц и ряда других факторов. Однако в настоящее время появились технологии получения частиц нанометрового диапазона (рис. 1), в частности способ плазменной переконденсации исходного сырья [8, 9].

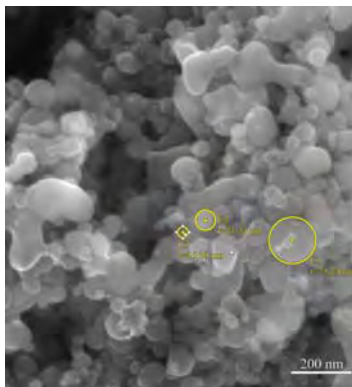


Рис. 1. Морфология поверхности нанодисперсных частиц, применяемых для получения нанокomпозиционного покрытия.

Кроме известных уникальных свойств таких частиц, они обладают высокой химической активностью и повышенной седиментационной стойкостью в жидкостях, что особенно важно при получении качественных нанокomпозиционных покрытий. Широкая гамма нанодисперсных материалов, применяемых для получения покрытий, дает возможность задавать им физико-механические свойства в соответствии с требованиями производства.

Для получения таких покрытий возможно применение различных нанодисперсных материалов: чистых (Cu, Zn, Ni, Fe, MoS₂, Al, BN), бинарных (Cu-Zn, Cu-Ni, Cu-Sn, Cu-Pb), легированных (Cu-Zn-P, Cu-Zn-S, Cu-Ni-P, Cu-Ni-S, Cu-Sn-P, Cu-Sn-S, Cu-Pb-P, Cu-Pb-S) и композиционных (Cu-Al₂O₃, Cu-BN, Cu-MoS₂, Cu-ZnO₂) [10–12].

Добавляя нанодисперсные порошки в электролиты и растворы, получают покрытия с необходимыми физико-механическими свойствами, а именно повышение их микротвердости, износостойкости, антифрикционных характеристик, коррозионной стойкости и т.д.

В связи с этим на кафедре «Надежность и ремонт машин» Саратовского ГАУ им. Н.И. Вавилова проводятся исследования по определению

влияния нанодисперсных частиц на физико-механические свойства и структуру нанокomпозиционных покрытий на основе хрома, так как они являются наиболее перспективными для создания твердых, износостойких, антифрикционных и коррозионностойких покрытий [1, 2, 5, 13].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

При выборе материала нанодисперсных частиц руководствовались основными соображениями, что частицы должны:

- обладать достаточной твердостью для увеличения микротвердости покрытия;
- обладать высокой химической стойкостью и хорошей смачиваемостью в электролите;
- обеспечивать повышенную коррозионную стойкость и износостойкость покрытий.

В соответствии с этими требованиями для получения нанокomпозиционных покрытий была отобрана группа нанодисперсных порошков: Al₂O₃, SiC, TiC, WC [1, 5].

Методика проведения исследований предусматривала:

- определение наиболее эффективной нанодисперсной фазы (эффективность оценивали по микротвердости полученных покрытий);
- проведение исследований структуры и состава полученных покрытий;
- проведение испытаний на износостойкость и коррозионную стойкость полученных покрытий.

Схема технологического процесса получения нанокomпозиционных покрытий на основе хрома практически не отличается от общепринятой схемы процесса хромирования в стандартном электролите и состоит из следующих основных операций:

- предварительное обезжиривание;
- промывка в горячей воде;
- монтаж деталей на подвеске и изоляция поверхностей, не подлежащих хромированию;
- обезжиривание химическое;
- декапирование;
- хромирование;
- обезводороживание.

Варьируя составом электролита хромирования, концентрацией компонентов, а также изменяя режимы, можно получить нанокomпозиционные покрытия на основе хрома с самыми различными физико-механическими свойствами в соответствии с требованиями производства.

Для получения нанокomпозиционных покрытий на основе хрома был выбран универсальный электролит хромирования (CrO₃ – 250 г/л, H₂SO₄ – 2,5 г/л). Такой электролит широко рас-

пространен в ремонтном производстве, так как позволяет получать качественные хромовые покрытия с высокой микротвердостью (800–1000 HV). Кроме того, он дает возможность в широком диапазоне изменять физико-механические свойства покрытий при изменении режимов хромирования, что очень важно для исследования и создания новых износостойких покрытий [1, 5]. Режимы нанесения покрытия: плотность тока – 55 А/дм², температура электролита – 50°C, перемешивание – естественное, отношение площади анода к площади катода – 1,5:1, материал подложки – сталь углеродистая.

Полученное покрытие в процессе работы детали может подвергаться воздействию температуры, механических нагрузок, нагрузок от собственных напряжений и других внешних и внутренних сил. Наиболее напряженным местом является граница между покрытием и основным металлом. В связи с этим прочность сцепления покрытия с основным металлом – один из важнейших факторов, определяющих возможность применения гальванических покрытий. В качестве метода испытания покрытий на прочность сцепления с основой был выбран метод изгиба. Он позволяет оценить прочность сцепления покрытия с основным металлом. Метод заключается в осаждении металла на пластину толщиной 2 мм и в последующем ее изгибе под углом 90° в обе стороны до излома пластины. В месте излома покрытие не должно отслаиваться.

Как известно, физико-механические свойства покрытий являются следствием формирования определенной структуры электролитических осадков. Морфология и химический элементный состав поверхности полученных покрытий исследовали с помощью растрового электронного микроскопа MIRA 2 LMU производства фирмы Tescan (Чехия), оснащенного системой энергодисперсионного микроанализа INCA Energy 350. Данный исследовательский комплекс предназначен для получения изображения морфологии поверхности объекта с высоким пространственным разрешением, а также информации о химическом элементном составе поверхностных слоев покрытий. Разрешающая способность микроскопа достигает 1 нм, а чувствительность детектора INCA Energy – 133 эВ/10 мм², что позволяет анализировать химические элементы от бериллия до плутония. Способ исследования – энергодисперсионный (ЭДС). Исследования проводились в режиме высокого вакуума порядка 10⁻² Па при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Одним из основных свойств, характеризующих качество материала деталей машин, работающих в условиях интенсивного изнашивания, является износостойкость. Процесс изнашивания

материалов зависит от многих факторов и связан со сложными физико-механическими, структурными и химическими изменениями в поверхностных слоях, происходящими при трении. Испытания на износостойкость полученных покрытий проводили на машине трения МИ-1М по схеме «ролик – колодка». Колодки и ролики изготавливали из стали ШХ15. Твердость ролика составляла HRC 50–55. На колодки наносили исследуемые покрытия. Испытания проводили в двух средах: на чистом дизельном топливе и на дизельном топливе с добавлением кварцевого абразива с размерами частиц менее 5 мкм при концентрации 3% по массе. Регистрацию момента трения осуществляли самопишущим устройством машины трения. Перед испытанием проводили ее тарировку. Продолжительность каждого опыта – 6 ч, частота вращения вала машины трения – 300 мин⁻¹, нагрузка на колодку – 650 Н. Перед проведением испытаний образцы пар трения прирабатывали в течение 4 ч на режимах основного испытания. Износ образцов определяли взвешиванием на аналитических весах марки ВЛА-200М с точностью измерения 1·10⁻⁴ г.

Многие детали машин работают в агрессивных средах и подвергаются коррозионному разрушению вследствие химического и электрохимического взаимодействия с внешней средой [13–15]. Под действием коррозии снижаются прочность и пластичность поверхности металла, ухудшаются фрикционные свойства деталей машин. На скорость коррозии металлов значительно влияют влажность воздуха, содержание в нем загрязнений (газы, частички соли и т.д.) и время пребывания влаги на поверхности металла. Поэтому исследование влияния нанодисперсных частиц на коррозионную стойкость получаемых покрытий является важным вопросом. Испытания образцов с исследуемыми покрытиями на коррозионную стойкость проводили при повышенной относительной влажности и температуре. При проведении испытаний детали предварительно взвешивали на аналитических весах типа ВЛА-200М и помещали в специальную камеру, в которой создавали солевой туман путем распыления раствора хлористого натрия концентрацией 50 г/дм³. Температура в камере составляла 35°C. Продолжительность испытаний 12 ч. Коррозионную стойкость покрытий оценивали по потере массы образцов после удаления продуктов коррозии. Для этого образцы после испытаний помещали в ванну с 8% раствором NaOH, в которой они находились в течение 30 мин при температуре 20°C.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На первом этапе исследований была определена наиболее эффективная упрочняющая фаза –

нанодисперсный порошок Al_2O_3 и его концентрация в электролите хромирования. Результаты измерения микротвердости полученных покрытий представлены в таблице.

Результаты измерения микротвердости хромовых покрытий

Материал нанодисперсных частиц	Среднее значение микротвердости, HV
–	1064
Al_2O_3	1386
SiC	1311
TiC	1360
WC	1286

Повышение микротвердости покрытия при соосаждении его с нанодисперсным порошком происходит вследствие создания частицами более жестких условий электрокристаллизации металла и нарушения тем самым кристаллической структуры с образованием дефектов (дислокаций) в кристаллической решетке.

Высокая микротвердость покрытий, полученных при соосаждении с частицами Al_2O_3 , объясняется не только высокой твердостью Al_2O_3 , но и тем, что Al_2O_3 в отличие от боридов, карбидов и нитридов более устойчив к агрессивным средам и термостоек. Кроме того, Al_2O_3 при обычных условиях не разлагается и не превращается в другие соединения. Данный порошок по сравнению с остальными имеет повышенный период индукции, что указывает на время, в течение которого электролит-суспензия нейтрализуется или разрушается [5, 7].

Для получения максимального эффекта от использования частиц нанодисперсной фазы нанесение покрытия необходимо проводить при оптимальных режимах, обеспечивающих заданные физико-механические свойства покрытия. Определение оптимальных условий нанесения покрытий и концентрации частиц нанодисперсной фазы в электролите связано с определенными трудностями из-за сложного характера взаимосвязи между основными режимами нанесения покрытия и качеством полученного покрытия, что и требует проведения значительного количества экспериментов. Для снижения затрат времени и материальных средств на выполнение исследований применили метод математического планирования эксперимента. В качестве параметра оптимизации была принята микротвердость полученных покрытий, так как она в значительной мере определяет сопротивление покрытия износу. В качестве факторов, оказывающих наибольшее влияние на параметр оптимизации, были выбраны: температура электролита, плотность тока и концентрация нанодисперсной фазы в электролите. В результате проведенных

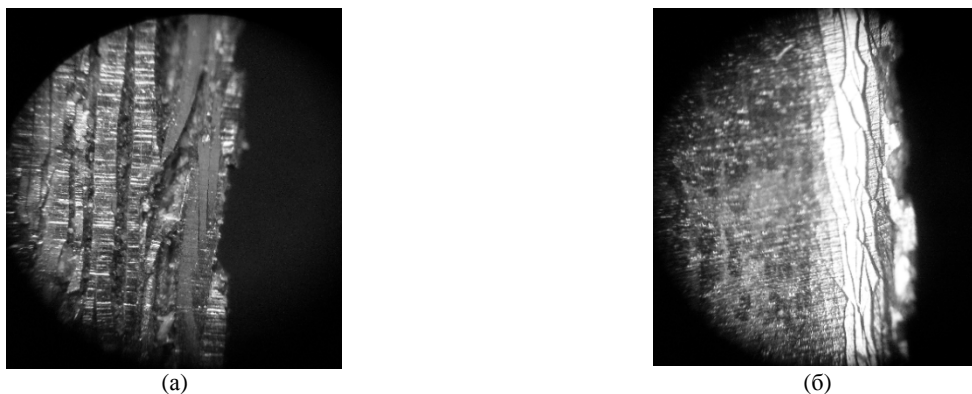
экспериментов были определены оптимальные режимы нанесения покрытий и концентрация нанодисперсной фазы в электролите, которые позволили достичь микротвердости покрытия – 1400 HV.

В результате проведения испытаний на прочность сцепления покрытий с основным металлом методом изгиба плоского образца получены следующие результаты, представленные на рис. 2.

На представленных фотографиях видно, что покрытие хрома без нанодисперсных частиц в месте излома растрескивается с образованием широких трещин и отслаивается от основного металла. Нанокпозиционное покрытие хрома также растрескивается, но с образованием мелкой сетки трещин отслоения металла покрытия от основного металла в месте излома не происходит. В результате этого можно сделать вывод, что прочность сцепления нанокпозиционного покрытия с основным металлом превышает прочность слоя хрома на разрыв. Мелкая сетка трещин в месте излома нанокпозиционного покрытия свидетельствует о снижении внутренних напряжений в покрытии хрома при введении в него нанодисперсных частиц.

На рис. 3 представлены фотографии поверхностей стандартного (базового) и нанокпозиционного покрытий хрома. Видно, что нанодисперсные частицы распределяются в покрытии достаточно равномерно, реализация внутренних напряжений происходит между близлежащими включениями, нанокпозиционное покрытие имеет более мелкую сетку трещин и более плотную структуру.

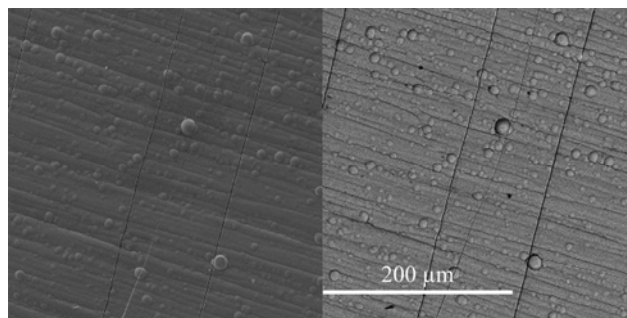
Для выявления веществ, из которых состоят исследуемые покрытия, были проведены испытания по определению химического элементного состава. На рис. 4 представлены диаграммы количественного элементного состава нанокпозиционного и стандартного (базового) покрытий хрома. Видно различие между химическими составами покрытий. В составе стандартного (базового) покрытия хрома основными элементами являются хром, кальций, углерод и кислород. В нанокпозиционном покрытии кроме основных элементов присутствует алюминий, который является основным элементом в применяемом нанодисперсном порошке. Углерод, кальций и кислород, выявленные в ходе проведения исследований на обоих образцах, входят в состав естественных загрязнений. Они могут быть обнаружены при любых исследованиях методом электронной микроскопии. Соединения этих элементов в виде загрязнений могут присутствовать как на поверхности самих образцов, так и внутри сканирующего электронного микроскопа. Коли-



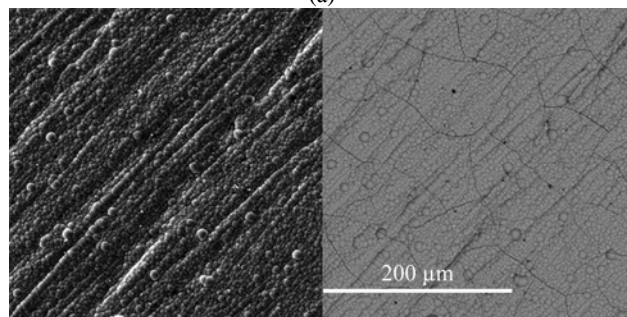
(a)

(б)

Рис. 2. Поверхности хрома после испытания на прочность сцепления (x80): (а) – гальваническое покрытие хрома без нанодисперсных частиц; (б) – нанокomпозиционное покрытие на основе хрома.



(a)



(б)

Рис. 3. Морфология поверхности хрома во вторичных (SE) (слева) и обратно отраженных (BSE) (справа) электронах: (а) – стандартное (базовое) покрытие хрома; (б) – нанокomпозиционное покрытие хрома. Для изображений в SE и BSE: увеличение 1000 крат, видимое поле 330,7 мкм, ускоряющее напряжение 20 кВ.

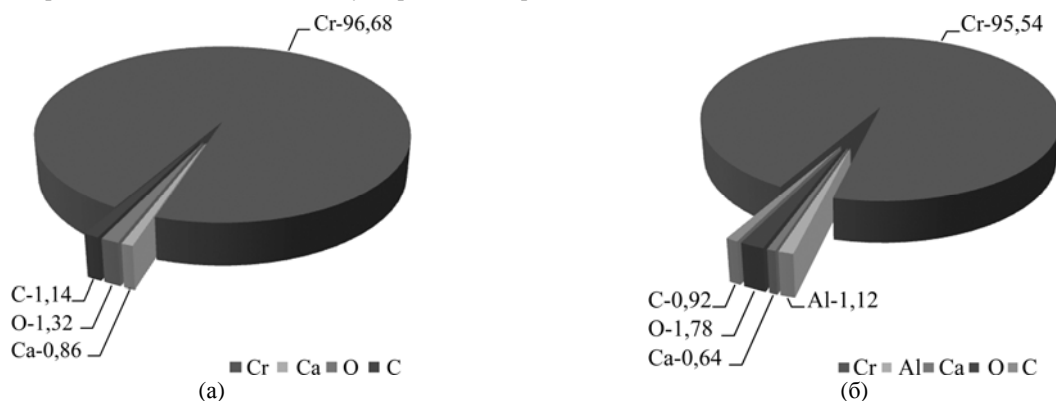


Рис. 4. Процентное соотношение химических элементов в стандартном (базовом) (а) и нанокomпозиционном (б) покрытиях.

чество обнаруженных элементов зависит от степени загрязнения образца и аппаратуры. Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что нанодисперсные частицы оксида алюминия внедряются в осаждаемое покрытие хрома.

В процессе проведения трибологических исследований получены следующие результаты.

При испытании на чистом дизельном топливе минимальные значения момента трения составили: нанокomпозиционного покрытия – $M_{тр} = 4,5$ Н·м, гальванического покрытия без нанодисперсных частиц – $M_{тр} = 7,3$ Н·м (рис. 5). При испытании на загрязненном дизельном топливе минимальные значения момента трения: нано-

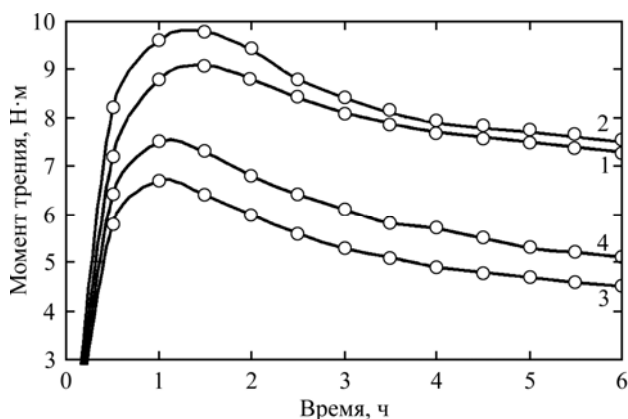


Рис. 5. Изменение момента трения в процессе испытаний: 1 – стандартное (базовое) покрытие, испытанное на чистом дизельном топливе; 2 – стандартное (базовое) покрытие, испытанное на загрязненном дизельном топливе; 3 – нанокompозиционное покрытие, испытанное на чистом дизельном топливе; 4 – нанокompозиционное покрытие, испытанное на загрязненном дизельном топливе.

композиционного покрытия – $M_{тр} = 5,1$ Н·м, гальванического покрытия без нанодисперсных частиц – $M_{тр} = 7,5$ Н·м. Средняя величина износа образцов с нанокompозиционным покрытием при испытании на чистом дизельном топливе в 2,0 раза, а на загрязненном дизельном топливе в 2,2 раза меньше, чем износ образцов с гальваническим покрытием без нанодисперсных частиц (рис. 6).

Более высокая износостойкость нанокompозиционного покрытия на основе хрома объясняется высокой микротвердостью таких покрытий, а также особенностями структуры. К особенностям структуры можно отнести более мелкую сетку микротрещин в покрытии, которая, по видимому, способствует тому, что не происходит скалывания покрытия в результате взаимодействия с абразивными частицами. Таким образом, можно сделать вывод, что нанокompозиционное покрытие на основе хрома по сравнению с гальваническим хромом без нанодисперсных частиц обладает повышенной износостойкостью за счет более высокой микротвердости и более мелкой сетки трещин в покрытии.

В результате проведенных испытаний на коррозионную стойкость было установлено, что уменьшение массы образцов с нанокompозиционным покрытием в среднем составило $0,32$ г/м²·ч, а у образцов, покрытых хромом без нанодисперсных частиц, в среднем $0,58$ г/м²·ч, что в 1,8 раза меньше.

ВЫВОДЫ

Вышеизложенное свидетельствует о том, что применение нанодисперсных частиц Al_2O_3 при получении нанокompозиционных покрытий на основе хрома позволяет улучшить основные

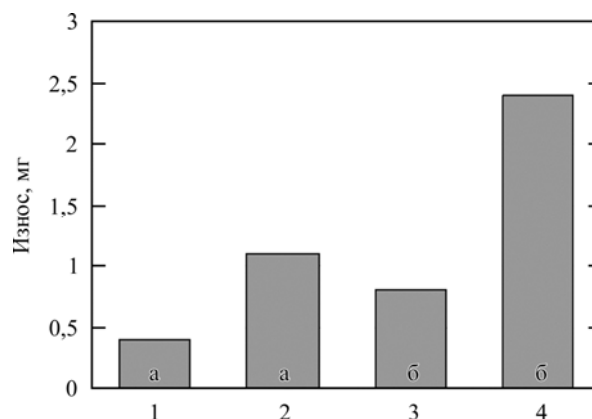


Рис. 6. Износ образцов в процессе испытания на износостойкость с использованием чистого (а) и загрязненного (б) дизельного топлива: 1, 3 – образцы с нанесенным нанокompозиционным покрытием; 2, 4 – образцы со стандартным (базовым) покрытием.

физико-механические свойства получаемых покрытий (микротвердость, износостойкость, коррозионную стойкость). Область применения таких покрытий достаточно разнообразна. Они являются перспективными не только для упрочнения и восстановления ответственных деталей машин, работающих в условиях интенсивного изнашивания, но и для повышения жаростойкости деталей, защиты от коррозии в атмосферных условиях и агрессивных средах, повышения срока службы мерительного и режущего инструмента, штампов, пресс-форм и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антропов Л.И., Лебединский Ю.Н. *Композиционные электрохимические покрытия и материалы*. Киев: Техника, 1990. 200 с.
2. Сафонов В.В., Годунов Н.Б., Шишурин С.А., Семочкин В.С. Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники с применением новых материалов. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2012, (8), 36–40.
3. Сайфуллин Р.С. *Неорганические композиционные материалы*. М.: Химия, 1983. 304 с.
4. Сафонов В.В., Шишурин С.А., Семочкин В.С. Теоретическое обоснование повышения ресурса деталей упрочненных ультра- и нанокompозиционным химическим никелированием. *Научное обозрение*. 2012, (1), 21–27.
5. Бородин И.Н. *Порошковая гальванотехника*. М.: Машиностроение, 1990. 218 с.
6. Кравчук В.С., Юсеф А.А., Кравчук А.В. *Сопrotивление деформированию и разрушению поверхностно упрочненных деталей машин и элементов конструкций*. Одесса: Астропринт, 2000. 160 с.
7. Гурьянов Г.В. *Электроосаждение износостойких композиций*. Кишинев: Штиинца, 1985. 238 с.
8. Кириллин В.И., Добринский Э.К., Красюков Е.А., Малашин С.И. *Способ получения ультрадис-*

- персного порошка и устройство для его осуществления.* Пат. № 2207933 Российская Федерация, МПК В22F9/12. № 2001118997/02; заявл. 10.07.2001; опубл. 10.07.2003.
9. Мелешко В.Ю., Карелин В.А., Павловец Г.Я., Малашин С.И., Добринский Э.К., Красноков Е.А. *Способ получения ультрадисперсного порошка и устройство для его осуществления.* Пат. № 2238174 Российская Федерация, МПК В22F9/14. № 2008103489/02; заявл. 05.02.2008; опубл. 20.12.2009.
 10. Сафонов В.В., Шишурин С.А., Годунов Н.Б., Семочкин В.С. *Наноконпозиционные никель-фосфорные покрытия с улучшенными эксплуатационными свойствами.* *Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова.* 2011, (12), 43–45.
 11. Сафонов В.В., Шишурин С.А., Семочкин В.С. *Раствор для химического осаждения композиционных никелевых покрытий.* Пат. № 2465374 Российская Федерация, МПК С25D15/00. № 2011111482; заявл. 25.03.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. изобр. № 23.
 12. Сафонов В.В., Добринский Э.К., Малашин С.И., Шишурин С.А., Гольдберг А.Р., Сафонов К.В. *Способ получения композиционных электрохимических покрытий на основе хрома.* Пат. № 2283373 Российская Федерация, МПК С25D15/00. № 2004126058/02; заявл. 25.08.2004; опубл. 10.09.2006, Бюл. изобр. № 25.
 13. Сафонов В.В., Шишурин С.А., Семочкин В.С. *Оценка прочности сцепления наноконпозиционных никель-фосфорных покрытий с основой.* *Материалы Межгос. науч.-техн. семинара «Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания»*, Саратов. 2012. С. 103–105.
 14. Шлугер М.А. *Коррозия и защита металлов.* М.: Металлургия, 1981. 216 с.
 15. Лебедев А.Т., Лебедев П.А., Васин В.А. *Повышение эффективности дизельной топливной аппаратуры.* *Тракторы и сельхозмашины.* 2011, (7), 43–45.
 16. Лебедев П.А., Лебедев А.Т. *Режимы работы двигателей и расход топлива.* *Сельский механизатор.* 2011, (12), 30–31.

Поступила 21.10.14

После доработки 15.12.14

Summary

The results are presented related to the research into the structure, chemical composition, and the basic service properties of nanocomposite galvanic coatings of chromium. The nanodispersed phase allowing to increase microhardness, wear resistance, and corrosion resistance of the formed coatings is determined. The percentage of the basic chemical elements of nanocomposite galvanic coatings based on chromium is established.

Keywords: nanocomposite coating, electroplating, nanodispersed materials, microhardness, wear resistance, corrosion resistance.