

УДК 621.892.09+621.357.7

НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

**Сафонов В.В., д.т.н., проф.,
Шишурин С.А., к.т.н., доц.,
Азаров А.С., канд. к.т.н., доц.,
Сафонов К.В., старший преподаватель
(ФГБОУ ВПО "Саратовский ГАУ",
кафедра «Надёжность и ремонт машин», Россия)**

Представлены методы повышения ресурса агрегатов и деталей технических объектов за счёт применения наноразмерных порошков металлов и их соединений в качестве добавок к смазочным материалам и при получении композиционных гальванических покрытий. Приведены результаты лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний.

Конец XX – начало XXI веков – период интенсивного развития нанотехнологий. Нанотехнологии открыли большие перспективы при разработке новых материалов, совершенствовании средств связи, развитии микроэлектроники, энергетики, биотехнологий и т.д.

Не отстает от перечисленных направлений и наноинженерия поверхностей деталей технических объектов. При этом наиболее широкое распространение получили методы формирования поверхностных структур с необходимыми свойствами путём применения наноразмерных частиц металлов в виде добавок к смазочным материалам и при нанесении гальванических покрытий. Это связано с тем, что у наночастиц были обнаружены особые физические и химические свойства, которые зачастую радикально отличаются от свойств этого же вещества в обычной форме.

В нашем случае для производства наноразмерных порошков (НПП) металлов была выбрана технология, основанная на испарении сырья (крупнодисперсного порошка или прутка) в плазменном потоке с температурой до 8000 К и конденсации пара до частиц требуемого нанометрового диапазона.

Выбранная технология позволяет получать НПП не только чистых металлов и сплавов, но и производить их легирование различными элементами в одной стадии. Данным способом синтезированы следующие классы порошков: чистые (Cu, Zn, Ni, Fe, Ti, Al, BN, Mo, MoS₂); бинарные (Al-Pb, Cu-Zn, Cu-Ni, Cu-Sn, Cu-Pb); легированные (Cu-Zn-P, Cu-Zn-S, Cu-Ni-P, Cu-Ni-S, Cu-Sn-P, Cu-Sn-S, Cu-Pb-P, Cu-Pb-S); композиционные (Cu-Al₂O₃, Cu-BN, Cu-MoS₂, Cu-ZnO₂). Полученные частицы (рисунок 1) имеют форму, близкую к сферической, и характеризуются следующими параметрами: размер частиц – 10...30 нм, удельная поверхность – 100...150 м²/г.

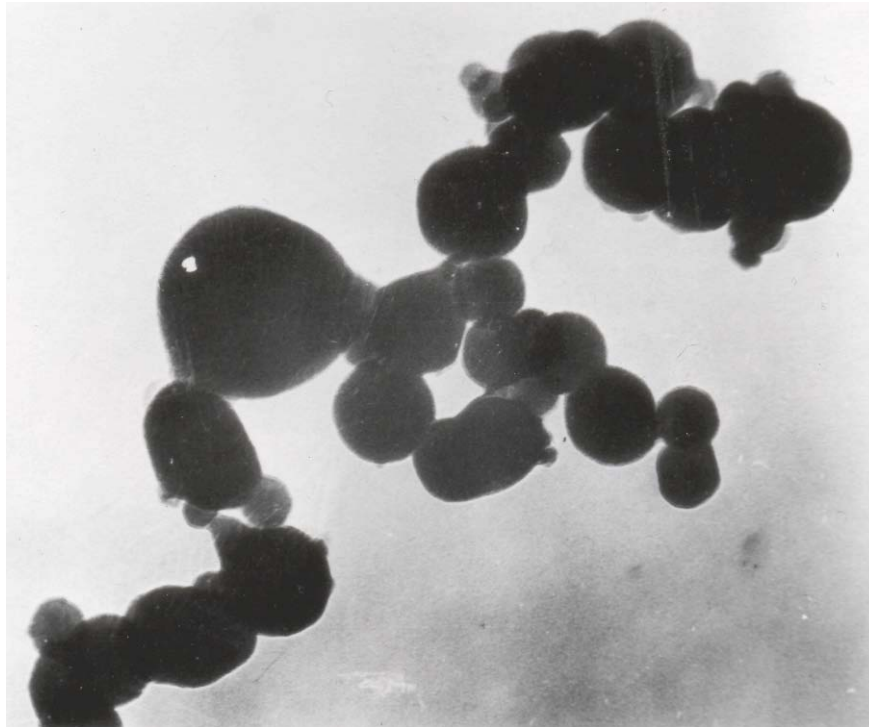


Рисунок 1 – Внешний вид НРП металлов, полученных, методом плазменной переконденсации

Одной из областей применения полученных НРП является модификация смазочных материалов. В ходе исследовательской работы, проводимой в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» были разработаны эксплуатационная присадка к моторному маслу «Кластер-М» (патент РФ №2260035) и смазочная композиция для тяжело нагруженных узлов трения «Кластер-С» (патент РФ №2258080).

Смазочная композиция «Кластер-М» представляет собой седиментационно-устойчивую суспензию смеси наноразмерных частиц дисульфида молибдена и наночастиц сплава латуни с фосфором в моторном масле М-10-Г₂ (ГОСТ 10541-78).

Пластичная смазочная композиция «Кластер-С» изготавливается путём модификации пластичной смазки Литол-24 (ГОСТ 21150-87) комплексом НРП Fe, Ni и Zn.

Для оценки эффективности использования НРП металлов и их соединений в качестве добавок к смазочным средам проводили лабораторные трибологические испытания разработанных смазочных композиций. Результаты испытаний сравнивали с результатами, полученными при испытании базовых смазочных материалов.

Испытания проводили на модернизированной машине трения МИ-1М. Для моделирования процессов фрикционного взаимодействия основных видов трибосопряжений использовали модельные пары трения представленные в таблице 1.

Таблиця 1 – Моделі трибосопряжених і їх характеристики

№	Трибосопряження	Модель	Матеріал елементів моделі трибосопряження	Размери: зовнішній діаметр ролика (d), ширина ролика (b), довжина колодки по окружності (l), мм	Характеристики поверхностей тріння:	
					твєрдість	шероховатість, R _a
1.	Шейка коленчатого вала – вкладиш	ролик –	сталь 45 (ГОСТ 1050-88)	d = 50, b = 12	35...40 HRC	0,32
		колодка	сталь-сплав АО20-1 (ГОСТ 14113-78)	l = 19,5±1		
2.	Поршневе кільце – гільза циліндра	ролик –	СЧ-25 (ГОСТ 1412-85)	d = 50, b = 12	190...220 НВ	0,32
		колодка		l = 19,5±1		0,63
3.	Подшипник качення	ролик –	ШХ-15 (ГОСТ 801-78)	d = 50, b = 10	60...62 HRC	0,8
		ролик		d = 50, b = 12		0,8

Ефективність використання НРП металів в якості добавок к смазочним матеріалам оцінювали по наступним показателям: величині моменту тріння в трибосопряженні, величині износа образців і шерохватості поверхностей тріння. Крім того, при испытанні смазочної композиції «Кластер-М», неперервно контролювали температуру масла смазочної ванни. При испытанні смазочної композиції для тяжелонагружених вузлів тріння визначали величину навантаження викликаючої усталостне руйнування поверхностей тріння при ступенчатом її збільшенні.

Момент тріння в трибосопряженні і температуру масляної ванни контролювали неперервно в процесі испытань. Момент тріння реєструвався неперервно на самопишущем пристрої машини тріння. Температуру масла в масляній ванні вимірювали з допомогою термопары типу «хромель-копель» (ГОСТ 6616-94). Износ визначали взвешиванием деталей модельної пари тріння до і після испытань на аналітичних весах ДЛР-200М (ГОСТ 24104-80Е) з точністю 0,1 мг. Шерохватість робочої поверхності образців визначали на профілографі-профілометре мод. 201 заводу «Калибр».

Полученні результати трибологічних испытань (рисунок 2) дозволили установити, що використання смазочної композиції для автотракторних двигателів дозволяє знизити момент тріння в 1,6 разів в парі тріння, імітующої роботу сопряжения «шейка коленчатого вала – вкладиш» (см. рисунок 2, а) і в 1,21 разів в парі тріння імітующої роботу сопряжения «поршневе кільце – гільза циліндра, зменшити значення робочої температури смазочної ванни в 1,3 і 1,1 разів відповідно, износ в 1,7 (см. рисунок 2, б) і 2,4 разів, шерохватість поверхностей тріння в 1,5...2,6 разів по сравнению з результатами испытань образців на моторному маслі М-10-Г₂.

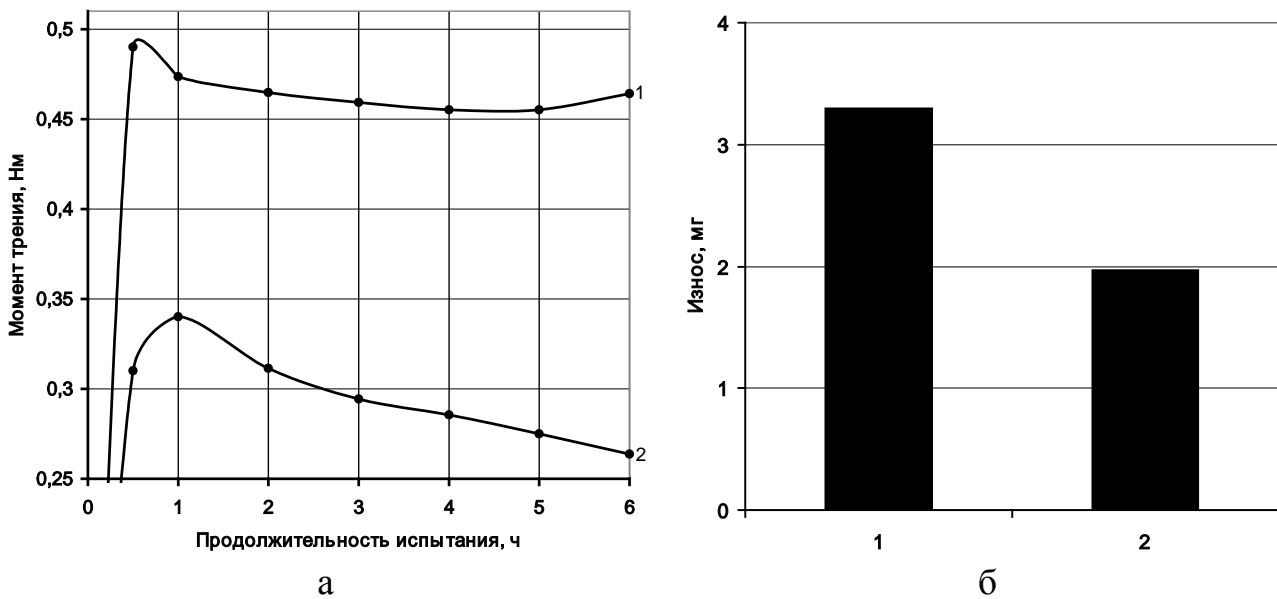
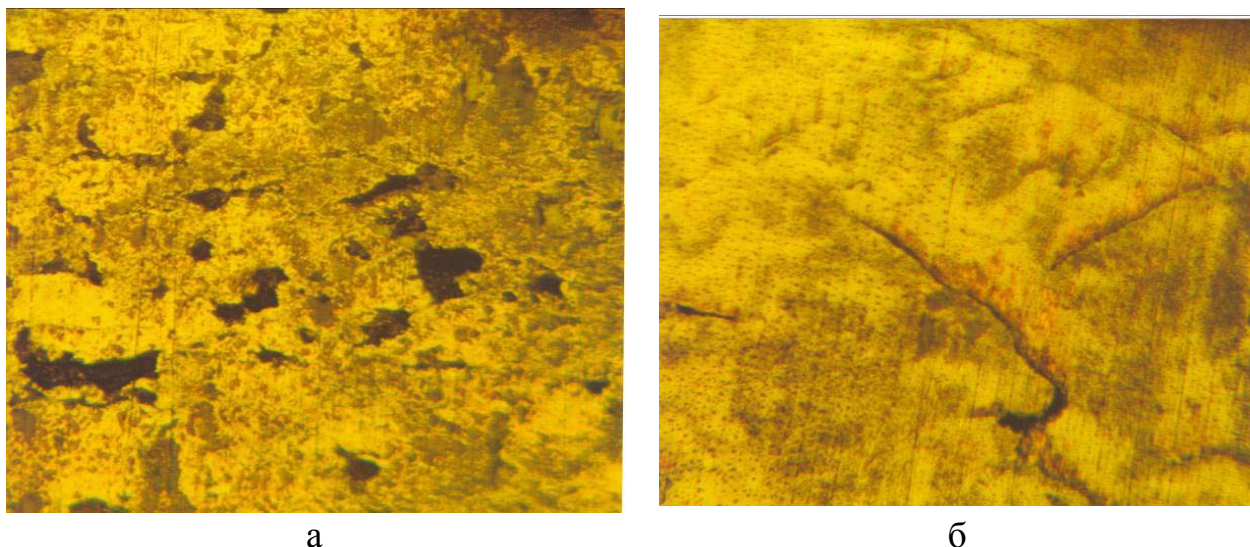


Рисунок 2 – Результаты антифрикционных (а) и противоизносных испытаний (б):

1 – М-10-Г₂; 2 – М-10-Г₂ + «Кластер-М»

Использование смазочной композиции «Кластер-С» привело к уменьшению среднего значения момента трения в 1,1 раза, износа роликов в 2,3 раза, снижению значения шероховатости в 2,2 раза и повышению нагрузки вызывающей усталостное выкрашивание поверхностей трения в 1,6 раза, в сравнении с результатами испытаний образцов на базовой пластичной смазке Литол-24.

Полученный эффект от использования НРП металлов в составе смазочных материалов можно объяснить следующим образом. При работе трибосопряжений технических объектов зоны непосредственного контакта вершин выступов микронеровностей поверхностей трения являются активными центрами протекания интенсивных диффузионных, адсорбционных, хемосорбционных процессов, а также трибохимических реакций. При протекании перечисленных процессов благодаря высокому уровню свободной поверхностной энергии наночастиц в пятнах фактического контакта создаются благоприятные условия для взаимодействия компонентов добавок с поверхностями трения и образования прочных поверхностных плёнок (рисунок 3), содержащих используемые наноразмерные компоненты. Пластичные компоненты добавок способны нивелировать микронеровности, увеличивая фактическую площадь контакта поверхностей трения, что способствует снижению величины контактных напряжений. В тонком слое самих плёнок локализуются процессы деформации и изнашивания частиц основного материала детали, что может привести к значительному повышению ресурса моделируемых трибосопряжений технических объектов.



а

б

Рисунок 3 – Внешний вид поверхностей трения деталей модельных пар трения: после испытания: а – М-10-Г₂; б – М-10-Г₂ + «Кластер-М»

Для проверки справедливости данного предположения проводили стендовые и эксплуатационные испытания разработанных смазочных композиций.

Для оценки эффективности смазочной композиции «Кластер-М» проводили ускоренные стендовые и эксплуатационные испытания, результаты которых, подтвердили улучшение эксплуатационных показателей всех типов двигателей.

По бензиновым двигателям отмечено увеличение компрессии цилиндропоршневой группы на 30...50%, снижение расхода картерных газов на 40...60%, повышение давления в системе смазки на 15...25%, снижение токсичности выхлопных газов в 1,5...2,5 раза, увеличение ресурса двигателей в среднем в 1,6 раза.

Результаты испытаний дизельных двигателей показали повышение компрессии цилиндропоршневой группы на 20...40%, снижение расхода картерных газов на 15...20%, увеличение давления в системе смазки на 10...15%, уменьшение дымности выхлопных газов на 20...30%, повышение ресурса двигателей в среднем в 1,8 раза.

Для оценки ресурсосберегающей способности смазочной композиции «Кластер-С» проводили стендовые испытания 40 радиально-упорных подшипников 7202 (ТУ 37.006.162-89), из которых 20 испытывали на товарной смазке, а остальные 20 – на разработанной смазочной композиции. Испытания проводили на испытательной машине ЦКБ-50 в соответствии с методикой периодических стендовых испытаний подшипников качения М ВНИИП.020-04.

В ходе испытаний контролировали температуру наружных колец подшипников и наличие следов усталостного выкрашивания на поверхностях качения деталей подшипников. Ресурс подшипников определяли по продолжительности их работы до повышения рабочей температуры более чем на 20 °С.

В результате проведения стендовых испытаний установили, что ресурс подшипников, соответствующий 90 %-й надёжности, работавших на пластичной смазке Литол-24, составил 78 ч, а подшипников, смазку которых осуществляли разработанной смазочной композицией, – 186 ч, что в 2,4 раза больше. Кроме того, использование смазочной композиции «Кластер-С» привело к снижению температурного режима работы подшипников на 18 %.

Эксплуатационные испытания проводили по плану [NUT] согласно ГОСТ 27.410-87 с использованием автомобилей КамАЗ. При этом испытываемые смазочные материалы закладывали в подшипниковые узлы ступиц колёс. В ходе испытаний с периодичностью 10 тыс. км контролировали визуально состояние поверхностей качения деталей подшипников. Наступление предельного состояния определяли по наличию следов усталостного выкрашивания на рабочих поверхностях тел качения. По результатам эксплуатационных испытаний прогнозировали величину ресурса.

Расчеты показали, что ресурс подшипников смазываемых разработанной смазочной композицией увеличился в 2,8 раза по сравнению с подшипниками, работающими на пластичной смазке Литол-24.

Кроме того, отмечен положительный эффект от использования наноразмерных порошкообразных материалов в составе электролитов при получении композиционных гальванических покрытий (КГП).

Гальванические покрытия применяются в различных областях промышленности, в частности при упрочнении и восстановлении деталей машин. Однако при всех своих достоинствах гальванические способы восстановления имеют и существенные недостатки (недостаточно высокие прочность сцепления, микротвердость и износостойкость, склонность к дендридообразованию и ряд других), поэтому в последние годы успешно развиваются технологии осаждения композиционных гальванических покрытий. Особенность данных технологий заключается в том, 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 гальванических покрытий значительно изменяет свойства последних. Такие покрытия обладают уникальными свойствами и могут быть использованы для решения разнообразных задач.

Особый интерес в этой связи вызывает КГП на основе хрома, так как является наиболее перспективным для создания твердых, износостойких и антифрикционных покрытий.

Анализ литературных данных показал, что в качестве упрочнителей применяют частицы, волокна и усы различных материалов с размерами от 200 нм и более. Заращивание дисперсных материалов с такими размерами слоем хрома затруднено из-за низкой скорости осаждения гальванического хрома и седиментации частиц. Однако ранее названная технология плазменной перекомденсации позволяет получать НРП с размером частиц в десятки нанометров.

В связи с этим в ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ» проведен ряд экспериментов по изучению влияния оказываемого НРП Al_2O_3 , SiC, TiC и WC на физико-механические свойства и морфологию гальванического покрытия хрома.

С целью определения наиболее эффективной нанодисперсной фазы проводили эксперименты, согласно которым лучшие результаты показал НРП оксида алюминия. С его использованием достигнута микротвердость КГП на основе хрома 14 ГПа. Микротвердость гальванического покрытия хрома без нанодисперсных частиц составляла в среднем 10 ГПа.

Изучение структуры полученных покрытий позволило установить, что на поверхности КГП (рисунок 4, а) отсутствуют трещины, тогда как при обычным хромировании поверхность имеет достаточно глубокую сетку трещин (рисунок 4, б). Установлено также, что частицы распределяются в покрытии достаточно равномерно и КГП более четко повторяет контуры основного металла.

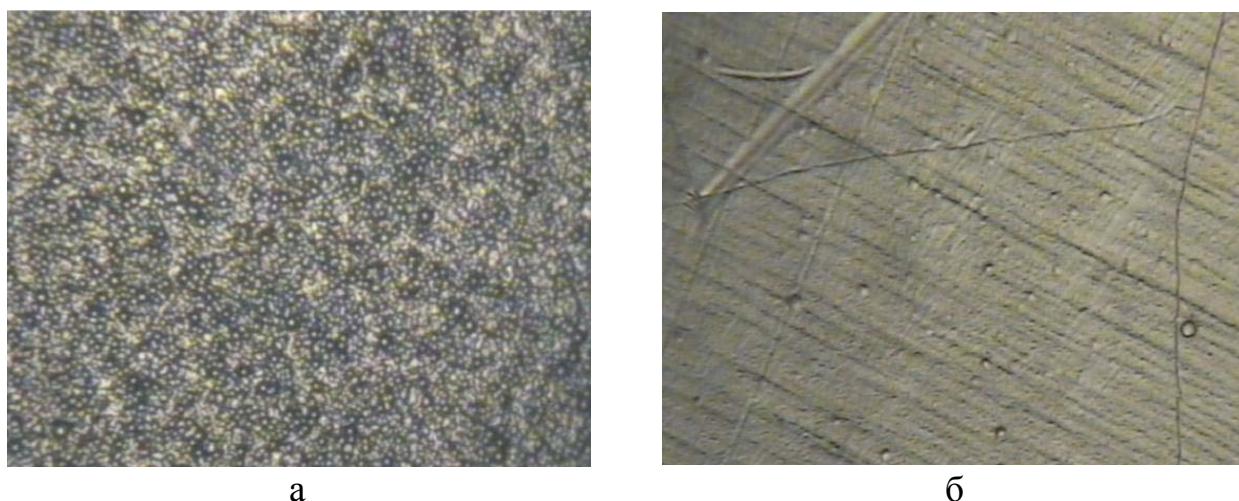


Рисунок 4 – Морфология покрытий: а – КГП на основе хрома; б – стандартное (базовое) гальваническое покрытие хрома

С целью определения элементного и количественного состава КГП на основе хрома провели масспектральный анализ.

В результате чего получены спектрограммы гальванических покрытий (рисунок 5). При этом в КГП (см. рисунок 5, а) было обнаружено наличие алюминия порядка 1,85%, тогда как при анализе стандартного покрытия хрома (см. рисунок 5, б) алюминия в покрытии обнаружено не более 0,01%.

Проведенные исследования структуры и состава КГП показали, что нанодисперсные частицы, вводимые в электролит хромирования, в процессе электролиза внедряются в гальваническое покрытие, что приводит к снижению трещиноватости и к изменению его структуры.

Для определения антифрикционных и противоизносных свойств КГП проводили трибологические испытания хромированных образцов на машине трения МИ-1М по схеме «ролик–колодка». В результате проведенных

испытаний установлено, что весовой износ образцов с КГП в среднем в 2,2 раза меньше чем износ образцов покрытых чистым хромом. Высокая износостойкость КГП на основе хрома объясняется его высокой микротвердостью, а также особенностями структуры. В частности отсутствие трещин в покрытии способствует тому, что не происходит скалывания покрытия в результате взаимодействия с абразивными частицами.

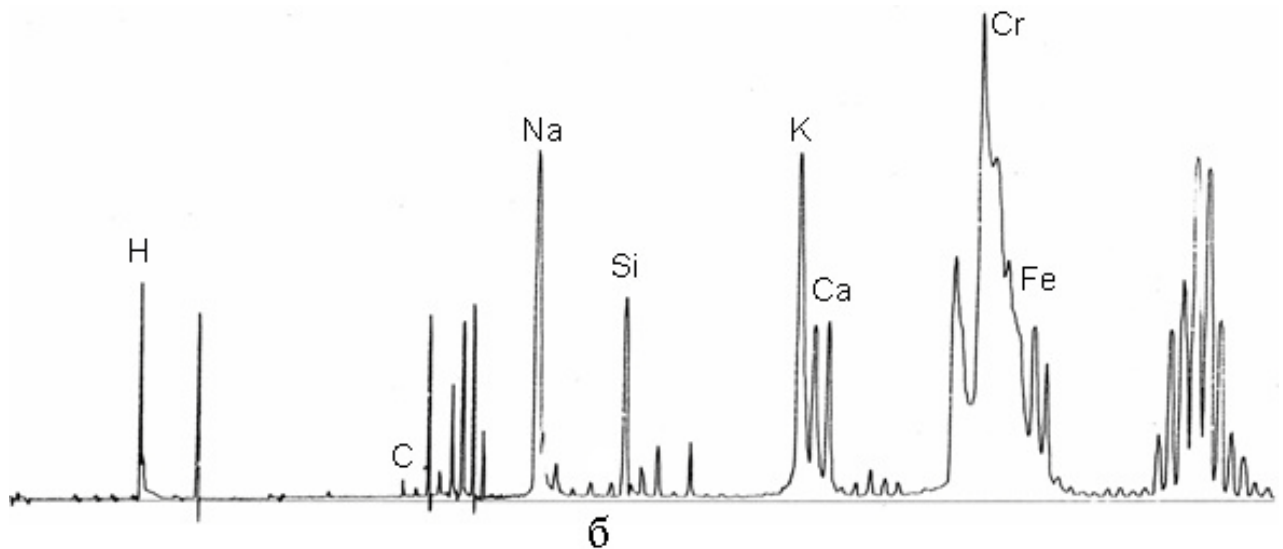
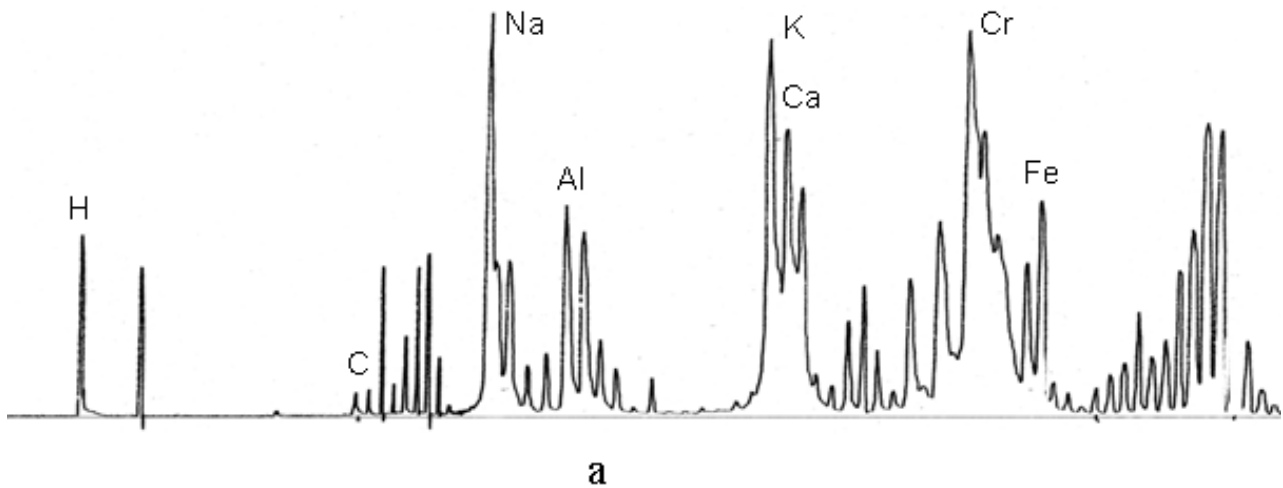


Рисунок 5 – Спектрограммы покрытий: а – КГП на основе хрома; б – стандартное (базовое) гальваническое покрытие хрома

С целью определения коррозионной стойкости КГП проводили испытания в камере коррозионных испытаний при повышенной относительной влажности и температуре с периодической конденсацией влаги и введением агрессивной составляющей – хлористого натрия. В результате установлено, что коррозионная стойкость покрытий, полученных с применением НРП в 1,8 раза выше, чем чистого хрома.

На основании проведенных лабораторных исследований разработаны

рекомендации по нанесению КГП на основе хрома и предложена технология восстановления плунжерных пар топливных насосов высокого давления автомобилей КамАЗ. На способ получения КГП на основе хрома получен патент РФ №2283373.

Для испытания восстановленных плунжерных пар использовали метод ускоренных износных испытаний. Испытания проводили на стенде КИ-15711М-01 ГОСНИТИ, который оснащали термокамерой и смесителем, позволяющими поддерживать температуру и заданную загрязненность топлива.

В результате ускоренных стендовых испытаний цикловая подача серийных плунжерных пар снизилась на 38 %, в то время как восстановленных с применением композиционного хромирования – на 18 %.

Сравнительные эксплуатационные испытания топливных насосов с восстановленными и серийными плунжерными парами проводили на автомобилях КамАЗ. По полученным в результате испытаний данным ресурс плунжерных пар, восстановленных с применением КГП на основе хрома оказался в среднем в 1,7 раза выше ресурса серийных плунжерных пар.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что применение нанодисперсных частиц цветных металлов и их соединений в качестве добавок к смазочным материалам и при получении КГП позволяет существенно улучшить основные физико-механические свойства поверхностных слоев трущихся деталей машин и получаемых покрытий, что в итоге приводит к повышению ресурса как отдельных узлов и агрегатов, так и технических объектов в целом.

Abstract

Nanotechnological methods of savings a resource of technical installations

Safonov W.W., Shishurin S.A., Azarov A.S., Safonov C.W.

Methods of raise of a resource of assemblies and details of technical installations for the application account nanodimensional powders of metals and their joints in the capacity of additives to lubricants and at reception of composition platings are presented. Results laboratory, bench and service tests are resulted.