

УДК 621.7

## УПРОЧНЕНИЕ ЗУБЧАТЫХ И КУЛАЧКОВЫХ ПЕРЕДАЧ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ АВТОКАТАЛИТИЧЕСКИМИ ТВЕРДЫМИ ПОКРЫТИЯМИ Ni-P

Рева О.В., к.х.н., доцент, Кулаковский Б.Л., к.т.н., доцент, Маханько В.И.,  
Бугаева Е.А., Лахвич В.В., к.т.н.  
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

e-mail: volha107@rambler.ru

*Определены оптимальный фазовый состав и микроструктура автокаталитических защитных покрытий Ni-P с высокой микротвердостью, износо- и коррозионной стойкостью. Проведены испытания кулачковых валиков вакуумного затвора и деталей зубчатого барабана лебедки спасательного устройства, модифицированных покрытиями Ni-P, имитирующие их длительную работу в реальных условиях. Установлено, что твердые износостойкие покрытия Ni-P повышают ресурс эксплуатации оборудования не менее чем в 2 раза.*

*The optimum phase composition and microstructure of autocatalytic Ni-P coatings with high microhardness, wear and corrosion resistance were determined. The tests of the cam roller of vacuum shutter and parts of the winch serrate reel from rescue device, modified by Ni-P coatings, imitating their long-term work in the real conditions, were carried out. It was found, that hard wear-resistant Ni-P coatings increase the exploitation resource of the unit at most many 2 times.*

(Поступила в редакцию 27 января 2014 г.)

### Введение

В настоящее время существует проблема преждевременного выхода из строя техники самого различного назначения по причине интенсивной коррозии и механического износа ответственных деталей. Наиболее подвержены коррозии детали механизмов, работающих на открытом воздухе, трущиеся, вращающиеся, контактирующие с растворами агрессивных жидкостей. Детали пожарной аварийно-спасательной техники (ПАСТ) дополнительно подвергаются воздействию особо агрессивных газовых и жидкостных сред, многократным резким перепадам температур, рис. 1.



Зубчатая передача лебедки



Распределительный вал двигателя

Рисунок 1 – Фотографии изношенных деталей аварийно-спасательной техники

Так, в случае кулачковых передач вакуумных затворов головка кулачкового валика в форме выпукло-деформированной трапеции подвергается усиленному неравномерному износу, вследствие чего происходит потеря необходимой геометрии детали и, в конечном счете, отказ вакуумной системы пожарного насоса. Несмотря на то, что кулачковые валики изготавливаются из стали достаточно высоких марок (Ст30, Ст40Х), износ их весьма велик, а восстановление, которое проводится путем наплавки в кислородно-ацетиленовом пламени, достаточно трудоемко и экономически неоправданно [1,2].

Детали лебедки в связи с наличием значительного количества взаимосоприкасающихся подвижных элементов подвергаются повышенному, неравномерному механическому износу, а также коррозии, что является причиной ненадежной работы устройств. Наиболее интенсивному износу подвергаются контактирующие поверхности зубьев реборды барабана вследствие трения о конические ролики.

Данную проблему можно решить нанесением на уязвимые детали защитных покрытий в виде сплавов твердых металлов или композиционных материалов на их основе. Среди различных методов восстановления или упрочнения деталей: напыление (вакуумное, газотермическое, электродуговое), наплавка, припекание, цинкование (горячее, холодное, гальваническое, термодиффузионное), фосфатирование, комбинированные технологии нанесения покрытий с последующей их обработкой различными источниками энергии; наиболее экономичны и технологичны методы химического и электрохимического синтеза сплавов и композиционных пленок [1, 3, 4].

Наиболее перспективными для упрочнения зубчатых и кулачковых передач ПАСТ представляются сплавы и композиты на основе никеля, которые характеризуются твердостью и высокой коррозионной стойкостью. В последнее время все чаще с указанной целью применяются наноматериалы и наноструктурированные защитные покрытия, функциональные свойства которых значительно выше, чем традиционных металлопокрытий [5-8]. Композиционные материалы с включением неметаллических соединений в виде аморфной фазы характеризуются высокой микротвердостью и коррозионной стойкостью, и одновременно достаточно пластичны и паяемы [5-8].

Данному условию отвечают автокаталитические покрытия никель-фосфор, осаждаемые из гипофосфитных растворов. Они характеризуются следующими свойствами: микротвердостью от 6 000 до 12 000 МПа, высокой коррозионной стойкостью, антифрикционностью, способностью экранировать высокочастотные электромагнитные излучения, хорошей паяемостью. Микротвердость и износостойкость этих пленок существенно выше, чем у чистого никеля, и при образовании кристаллических фосфидов (что достигается финишными термообработками) не уступают стойкости хрома; однако во многих случаях они лимитируются пористостью пленок и их наводороживанием, приводящим к появлению микропустот и высоких внутренних напряжений (водородное охрупчивание) [4, 5, 9].

Несмотря на обилие эмпирических данных, в литературе отсутствуют четкие представления о зависимости физико-механических свойств автокаталитических покрытий от их фазового, химического состава и структуры, которые, в свою очередь, являются сложными нелинейными функциями от целого ряда условий синтеза [4,5]. Микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость пленок, как правило, возрастают с повышением содержания фосфора в покрытиях и уменьшением размеров образующих их зерен, но до определенных пределов, после чего происходит резкий качественный переход: покрытия разрыхляются, охрупчиваются, растрескиваются. Кроме того, на свойства покрытия оказывают влияние характеристики деталей, на которые они наносятся: природа подложки, микроструктура покрываемой поверхности, способ активации. Поэтому в каждом конкретном случае условия осаждения защитных покрытий Ni-P подбираются экспериментально.

В связи с вышеизложенным, **цель данной работы** – изучить физико-механические и защитные свойства композиционных пленок Ni-P, нанесенных на детали зубчатых и кулачковых передач механизмов ПАСТ, и на основе полученных данных определить оптимальные состав и структуру покрытий для упрочнения деталей, подверженных интенсивному износу и коррозии.

### **Методика эксперимента**

Химическое осаждение покрытий Ni-P проводили на стальные (Ст3) подложки из слабокислого ацетатно-аминоуксусного электролита в отсутствие блескообразующих добавок и ПАВ, при температуре 85-90 °С. Толщину покрытий оценивали гравиметрически на аналитических весах ВРЛ-200 с погрешностью  $\pm 0,05$  мг.

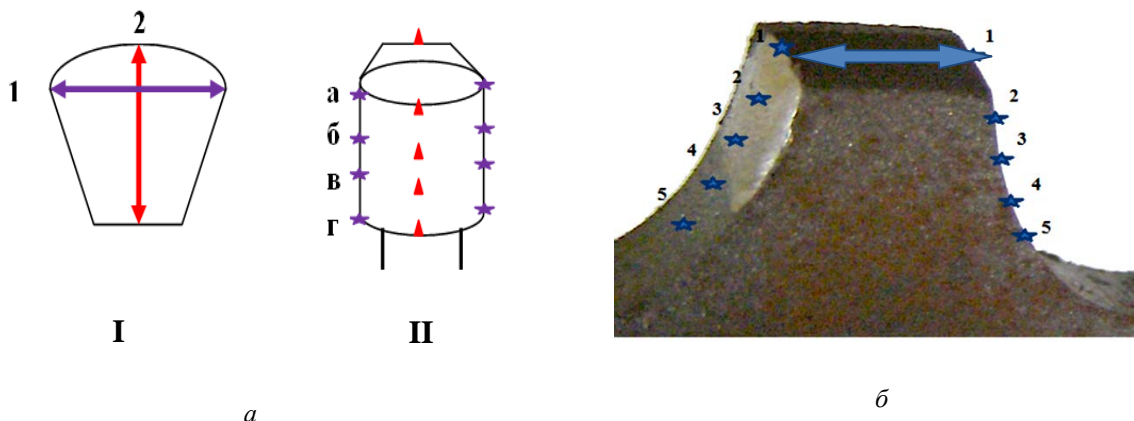
Фазовый состав покрытий изучали на дифрактометре ДРОН-3 в интервале углов  $2\Theta$  6-45° со скоростью записи 1 град/мин на  $\text{CuK}\alpha$  излучении; в качестве справочных данных использовали картотеку ASTM. Для изучения микроструктуры поверхности покрытий использовали растровый сканирующий электронный микроскоп марки LEO-1420. Локальный элементный состав поверхностной зоны пленок определялся методом электронно-зондового микрорентгено-спектрального анализа на рентгеновском микроанализаторе (EDX) типа RONTEC, являющегося приставкой к электронному микроскопу LEO-1420.

Коррозионную стойкость полученных покрытий изучали ускоренным лабораторным методом путем измерения потери массы образцами с толщиной покрытия не менее 15 мкм после пребывания их 30-90 минут в 1 М растворах  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (рН 1) и NaOH (рН 14) при температуре 50 °С; а также методом циклической вольтамперометрии с использованием потенциостата ПИ 50-1 с программатором ПР-8 и двухкоординатным самописцем ЛКД 4-003. Скорость развертки составляла 20 мВ/с.

Микротвердость сплавов измерялась по методике Виккерса на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 гр. Износостойкость покрытий определяли на трибометре ТАУ1-М методом сухого трения стального стержня по системе «палец-плоскость» при возвратно-поступательном движении индентора ВК8 (твердость 37 ГПа) со скоростью 4 мм/с при нагрузке 50 гр. Приборные исследования проведены на базе лаборатории ионно-плазменной модификации твердых тел физического факультета и лаборатории химии тонких пленок химического факультета БГУ.

Величину адгезионной прочности сцепления покрытия с подложкой измеряли по ГОСТ 9.302-88 и ГОСТ 9.311-97 методами нанесения сетки сквозных надрезов с шагом 1 мм тонким лезвием, и термического удара: стальные детали с покрытием нагревали в муфельной печи до температуры 300 °С, после чего опускали в воду с температурой 10 °С.

Работоспособность штатных и экспериментальных валиков вакуумных затворов оценивалась по разработанной нами методике. Испытания производились путем вращения валика в сборе с вакуумным затвором с помощью радиально-сверлильного станка с частотой 1 000 об/мин в течение 10 мин, что имитирует работу привода вакуумного затвора в течение 10 лет эксплуатации пожарной автоцистерны.

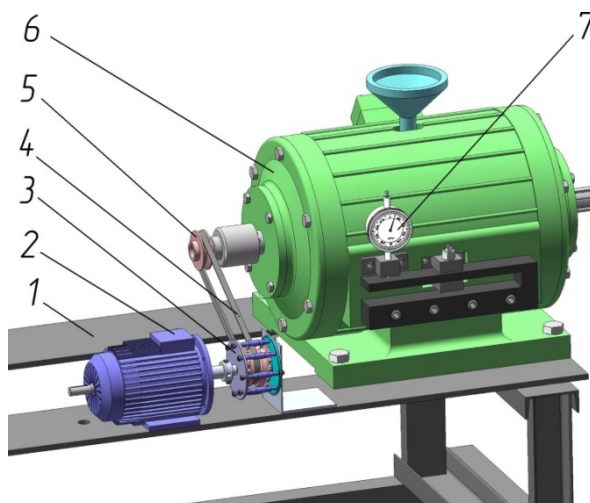


**Рисунок 2 – позиции и направление замеров до и после испытаний а: на головке кулачкового валика, I – вид сверху, II - вид сбоку; б: на зубьях реборды барабана**

Измерения геометрических характеристик головки кулачкового валика затвора вакуумного аппарата пожарного насоса до и после испытаний производились микрометром МК-50 с точностью до 1 мкм, согласно приведенной схеме, рис. 2, а. Направления замеров выбраны с учетом того, что наибольшие износ и деформации кулачковых валиков происходят в выпуклых областях головки по всей ее высоте.

Измерения геометрических характеристик зубьев реборды барабана производились микрометром МК-25.0.01 с ценой деления 0,01 мм согласно рис. 2, б. Направления замеров выбраны с учетом того, что наибольшие износ и деформации реборды происходят на вершине и на боковых сторонах трапецеидальных зубьев по всей их высоте.

Испытания лебедки в сборе со сферическими подшипниками проводились на специально разработанном стенде, рис. 3. Ступенчато повышая нагрузку от 25 до 50, 75 и 100 % от номинальной, производили обкатку барабана лебедки в течение часа на каждой ступени нагружения. Затем нагрузка повышалась до максимальной и проводились контрольные испытания в течение 3 часов.



1 – основание; 2 – электродвигатель; 3 – барабан лебедки; 4 – цепь; 5 – звездочка; 6 – тормоз порошковый; 7 – индикатор часового типа

**Рисунок 3 – Схема испытательного стенда**

Проведенные испытания учитывали специфику работы лебедки в приводе аварийно-спасательного устройства в условиях, близких к реальным. Лебедка проработала на описанном выше стенде при моменте нагружения 200 Н·м в течение 200 часов.

### Результаты и обсуждение

Из анализа литературных данных следует вывод, что покрытия Ni-P, наносимые на детали ПАСТ, должны быть одновременно как можно более плотными и мелкозернистыми (условие высокой коррозионной стойкости), но при этом мало напряженными, характеризующимися высокими адгезией и когезией (условие антифрикционности и большой предельной толщины). Ранее [11] в результате исследования закономерностей автокаталитического осаждения никеля гипофосфитом из электролитов различных комплексных типов (ацетатного, аммиачного, аминокислотного) нами установлено, что наиболее плотные, равномерные мелкозернистые пленки никеля осаждаются из аммиачных растворов и, по данным электронной микроскопии, состоят из зерен с размерами 20-40 нм, рис. 4, *а*. Однако они характеризуются сильными внутренними напряжениями, и, как следствие, хрупкостью и низкой предельной толщиной.

Менее напряженные покрытия осаждаются из ацетатно-аминокислотного раствора; они образованы агломератами в 3-8 мкм из очень плотно сросшихся едва различимых зерен с размерами 30-70 нм; которые, в свою очередь, сформированы из мелких плотно сросшихся зародышей размером 3-5 нм, рис. 4, *б*. В целом, покрытия, осажденные из ацетатно-аминокислотного раствора, характеризуются хотя и более развитой, но очень плотной структурой без пор и трещин, которая, предположительно, должна обладать очень высокими защитными свойствами.

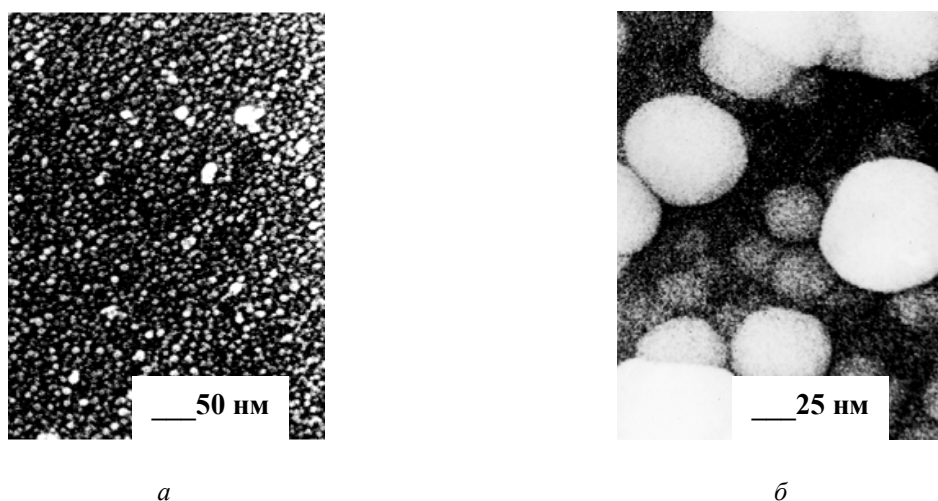


Рисунок 4 – Микрофотографии поверхности пленок Ni-P толщиной 5 мкм, осажденных: *а* – из аммиачного раствора, *б* – из ацетатно-аминокислотного раствора на стали (Ст3)

Результаты сопоставления микроструктуры этих покрытий с их физико-механическими свойствами свидетельствуют, что композиционные покрытия наилучшего качества: мало напряженные, с высокой адгезией к подложке и максимальной предельной толщиной (до 25 мкм), образованы из зерен с размерами ~30-50 нм, объединяющимися в агрегаты не более 1 мкм. Поэтому для модификации кулачковых и зубчатых передач были использованы именно эти покрытия, характеризующиеся многоуровневой структурой.

По данным рентгенофазового анализа данные покрытия из кристаллических фаз содержат только никель с очень искаженной кристаллической решеткой. Кристаллических соединений фосфора в покрытиях, не подвергнутых тепловым обработкам, обнаружено не было, однако сопоставление данных рентгенофазового и рентгеноспектрального анализа позволяет утверждать, что соединения фосфора включаются в состав пленок в достаточно ощутимых количествах, возрастающих по мере увеличения толщины пленки, таблица 1, но они рентгеноаморфны. Микротвердость нанокomпозиционного материала возрастает по мере увеличения концентрации фосфора в матрице (таблица 1).

Таблица 1 – Состав и микротвердость автокаталитических пленок Ni-P

S, мкм	Содержание фосфора, ат. %	Кристаллические фазы в исходных покрытиях	Кристаллические фазы после прогрева	Микротвердость, ГПа
1,6	4,42	Ni	Ni	2,37
3	5,27	Ni	Ni, Ni <sub>3</sub> P	2,5
4,5	6,54	Ni	Ni, Ni <sub>3</sub> P, Ni <sub>5</sub> P <sub>2</sub>	3,2
8,3	7,76	Ni	Ni, Ni <sub>5</sub> P <sub>2</sub>	3,66
12,2	11,06	Ni	Ni, Ni <sub>5</sub> P <sub>2</sub>	4,0
14,6	11,62	Ni	Ni, Ni <sub>5</sub> P <sub>2</sub> , Ni <sub>9</sub> P <sub>2</sub>	4,2
22,6	12,23	Ni	Ni, Ni <sub>5</sub> P <sub>2</sub> , Ni <sub>9</sub> P <sub>2</sub>	4,48

После прокаливания этих пленок при 300 °С в них кристаллизуются фосфиды никеля Ni<sub>3</sub>P, Ni<sub>5</sub>P<sub>2</sub> и Ni<sub>9</sub>P<sub>2</sub>, и их микротвердость возрастает до 6 ГПа. Вероятно, при дальнейшем наращивании толщины пленки и увеличении содержания в ней фосфора может произойти скачкообразный качественный переход с утратой когезии композиционного материала и резким снижением его микротвердости; однако в случае достаточно микрошероховатой поверхности исследуемых образцов (поверхность реальных деталей ПАСТ) данный предел прочности достигнут не был вплоть до толщины защитных покрытий 24 мкм.

Коррозионная стойкость покрытий, полученных из ацетатно-аминоуксусного электролита, также весьма высока в диапазоне толщин 2-24 мкм: в стандартных коррозионных средах (1М растворах кислот и щелочей) при 50 °С без наложения внешнего потенциала автокаталитические покрытия Ni-P практически не растворяются. При детальном исследовании особенностей коррозии композиционных пленок методом потенциодинамической вольтамперометрии обнаружено, что анодное растворение электрода из Ni-P начинается только при потенциале +550 мВ. Однако в реальных условиях эксплуатации защитных покрытий столь положительные потенциалы не могут возникнуть на поверхности детали самостоятельно, поэтому композиционные пленки на основе сплава Ni-P являются перспективными для защиты от газовой и жидкостной коррозии деталей ПАСТ.

Следует подчеркнуть, что в жидких средах, где мог бы реализоваться электрохимический механизм коррозии при образовании гальванопары деталь/покрытие реально коррозии не происходит, поскольку: во-первых электродные потенциалы железа (из которого изготавливается большинство деталей ПАСТ) и никеля весьма близки (-0,44 и -0,25 В соответственно); во-вторых поры и трещины, через которые жидкость проникает к поверхности детали, в данном покрытии отсутствуют и массоперенос ионов железа в жидкую фазу практически невозможен.

При испытаниях адгезионной прочности сцепления покрытий со стальными деталями методами термоудара (перепад 300-10 °С) и нанесения сетки сквозных надрезов на всех исследованных покрытиях не наблюдается образования пузырей, отслоений, сколов и

трещин, из чего согласно ГОСТ 9.302-88, ГОСТ 9.311-97 и данным сравнительных испытаний ЦЗЛ МТЗ можно сделать вывод, что величина адгезии покрытий к подложке составляет не менее 1 000 Н/м.

Особенно важным представлялось исследование особенностей сочетания твердости полученных покрытий с антифрикционными свойствами, поскольку они предназначались для упрочнения вращающихся деталей ПАСТ, а твердые сплавы никеля часто отличаются хрупкостью и плохой когезией. В результате изучения износостойкости автокаталитических никелевых покрытий было установлено, что тонкие пленки (до 5 мкм), содержащие всего 4-6 ат. % фосфора, отличаются в 2-3 раза большим коэффициентом трения, чем покрытия с толщиной 12-15 мкм, концентрация фосфора в которых достигает 11-12,3 ат. %, рис. 5.

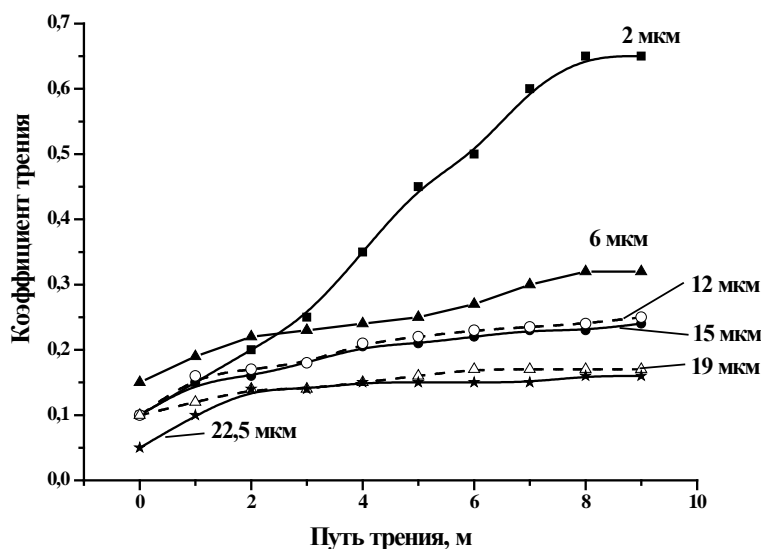


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента трения от пути трения для покрытий Ni-P различной толщины

Причем по мере приработки покрытия с малым содержанием фосфора коэффициент трения существенно возрастает. На первом участке, до 4 м, (путь приработки) коэффициент трения составляет ~0,15-0,2; затем он повышается до 0,5-0,6. Таким образом, после снятия верхнего окисленного слоя происходит активное истирание самого покрытия. Очевидно, этот эффект связан не только с концентрацией фосфора в покрытии и его микротвердостью, но и степенью кристалличности. Так, более толстые покрытия, которые отличаются очень искаженной кристаллической решеткой и высоким содержанием аморфных фаз, по износостойкости выше пленок с более упорядоченной кристаллической решеткой, несмотря на более высокое содержание фосфора; на всем пути трения их коэффициент трения не превышает 0,15, рис. 5.

Проведенные исследования свидетельствуют, что микротвердость и износостойкость автокаталитических покрытий Ni-P существенно зависят от их элементного и фазового состава и наиболее оптимально сочетаются для материалов с высоким содержанием аморфных соединений фосфора, что реализуется при толщине автокаталитических покрытий не менее 12 мкм. В сочетании с очень плотной микроструктурой и коррозионной стойкостью данные материалы обладают всем необходимым запасом свойств для модификации узлов трения, зубчатых и кулачковых передач, валов, и других ответственных деталей ПАСТ.

Защитные покрытия никель-фосфор толщиной 14-25 мкм (с оптимальным сочетанием фазового состава и микроструктуры) были нанесены на кулачковые валики вакуумного



затвора и зубчатый барабан лебедки со сферическими подшипниками для привода аварийно-спасательного устройства, после чего проведены испытания деталей, имитирующие их длительную работу в реальных условиях.

**Упрочнение и восстановление кулачковых передач вакуумного аппарата слоями Ni-P.** Сравнительный анализ исходных и модифицированных деталей показал, что валики без упрочнения в результате испытаний подверглись существенному износу: по направлению 1 износ детали составил от 7 до 27 мкм. Этот износ весьма неравномерен по высоте головки кулачкового валика – он максимален в позициях б и в; причем деформация в позиции в происходит с наклепом металла до +33 мкм. По направлению 2 износ составил от 9 до 12 мкм, причем также в позиции в, г отмечается наклеп металла до +44 мкм.

Детали с нанесенным защитным покрытием Ni-P при тех же условиях испытаний характеризуются значительно меньшим износом: по направлению 1 от 2 до 7 мкм с отсутствием наклепа; и по направлению 2 наблюдался износ порядка 2 мкм с наклепом металла в позиции а не более +10 мкм, рис. 6. Существенно меньший износ покрытия Ni-P (до 25-30 %) явно объясняется его уплотненной нанозернистой структурой и наличием в его составе высокотвердых рентгеноаморфных фаз.



**Рисунок 6 – Головка кулачкового валика после лабораторных испытаний:  
а – исходного, б – с защитным покрытием**

**Упрочнение и восстановление зубчатого барабана лебедки со сферическими подшипниками для привода аварийно-спасательного устройства слоями Ni-P.** По окончании стендовых испытаний при контрольной разборке редуктора было установлено, что величина износа зубьев реборды модифицированного защитным покрытием барабана составляет в среднем 26,8 мкм, тогда как исходного – до 57 мкм, таблица 2.

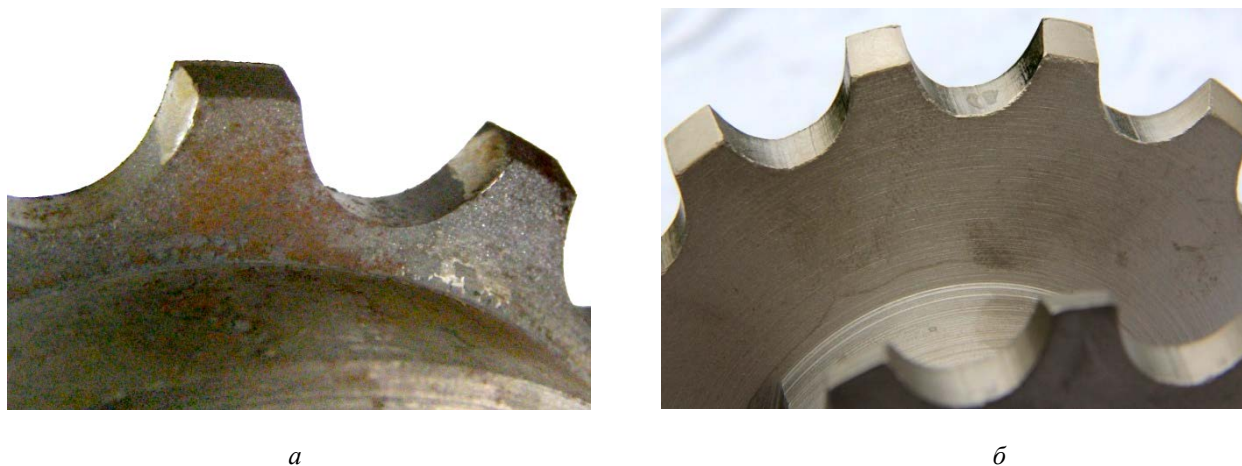
Таблица 2 – Результаты замеров износа зубьев барабана

Количество измерений	Направления измерений	Величина износа, мкм	
		без покрытия	с нанесенным модифицирующим покрытием
n <sub>1</sub>	1-1	60	28
n <sub>2</sub>	2-2	58	28
n <sub>3</sub>	3-3	55	26
n <sub>4</sub>	4-4	55	25
n <sub>5</sub>	5-5	57	27
n <sub>ср.</sub>	по всем	57	26,8



	направлениям	
--	--------------	--

Таким образом, износ зубьев реборды барабана с защитным автокаталитическим покрытием Ni-P после 200 часов его работы минимален, что значительно повышает его ресурс работы при дальнейшей эксплуатации в составе аварийно-спасательного устройства, рис. 7. Применение модифицирующего покрытия основных деталей лебедки в связи с его повышенной микротвердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью увеличивает ресурс эксплуатации изделия без ремонта ~в 2 раза.



**Рисунок 7 – Контактующая поверхность зубьев реборды барабана после стендовых ресурсных испытаний: а – без покрытия, б – подвергнутого обработке.**

### **Заключение**

Доказано, что композиционные автокаталитические покрытия Ni-P с наилучшими функциональными свойствами: мало напряженные, с высокой адгезией к подложке и толщиной не менее 25 мкм характеризуются многоуровневой микроструктурой с размерами зерен не менее 30-50 нм, тогда как наиболее мелкозернистые покрытия (размер зерен 3-5 нм) напряжены и пористы.

Доказано, что автокаталитические покрытия Ni-P с высоким содержанием аморфных фаз (которое увеличивается по мере утолщения покрытий и увеличения содержания в них фосфора) по износостойкости существенно выше пленок с более упорядоченной кристаллической решеткой. Эти же покрытия характеризуются и более высокой микротвердостью, которая достигает 4,5 ГПа; после прокаливания этих сплавов и кристаллизации аморфных фосфидов их микротвердость возрастает до 6 ГПа без нарушения прочности и когезии материала. Таким образом, микротвердость и износостойкость автокаталитических покрытий Ni-P наиболее оптимально сочетаются для материалов с содержанием аморфных соединений фосфора ~10-12 ат. %, что реализуется при толщине покрытий не менее 12 мкм; особенно важно, что эти характеристики не нарушаются вследствие тепловых обработок.

Установлено, что в стандартных коррозионных средах (1М растворах кислот и щелочей) при 50 °С без наложения внешнего потенциала +550 мВ и более, эти покрытия практически не растворяются. Величина адгезионной прочности сцепления покрытий Ni-P с подложкой составляет более 1 000 Н/м, что может гарантировать их надежность и долговечность в самых неблагоприятных условиях.

Испытания кулачковых валиков вакуумного затвора и деталей зубчатого барабана лебедки спасательного устройства, модифицированных автокаталитическими покрытиями

Ni-P, имитирующие их длительную работу в реальных условиях, показали, что нанокпозиционные пленки Ni-P являются надежной защитой от коррозии и механического износа деталей ПАСТ, подвергающихся износу, ударам, многократным механическим повреждениям и перепадам температур, повышающей ресурс их эксплуатации в ~2 раза. Данный метод нанесения защитных и упрочняющих покрытий характеризуется технической простотой, высокой скоростью осаждения и возможностью равномерного нанесения на детали сложной формы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Семнова, Л.В. Коррозия и защита от коррозии / Л.В. Семнова, А.В. Флорианович, А.В. Хорошилов. – 2 изд. – М.: Физматлит, 2006. – 427 с.
2. Кулаковский, Б.Л. Способы изготовления и восстановления деталей пожарной и аварийно-спасательной техники: Учебно-методическое пособие / Б.Л. Кулаковский, А.В. Кузнецов. – Минск: Изд. ГУО КИИ, 2000. – 110 с.
3. Гамбург, Ю.Д. Гальванические покрытия: Справочник по применению / Ю.Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2008. – 359 с.
4. Химическое осаждение металлов из водных растворов / В.В. Свиридов, Т.Н. Воробьева, Т.В. Гаевская, Л.И. Степанова / под ред. В.В. Свиридова. – Мн.: Университетское, 1987. – 270 с.
5. Наноматериалы, нанопокрyтия, нанотехнологии: Учебное пособие / Н.А. Азаренков, В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Л.В. Маликов, П.В. Турбин. – Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2009. – 209 с.
6. Андриевский, Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы // Журн. Рос. хим. общ. им. Д.И. Менделеева. – 2002, XLVI.– № 5. – С. 50-56.
7. Левашов, Е.А. Многофункциональные наноструктурированные пленки / Е.А. Левашов, В.Д. Штанский // Успехи химии.– 2007.– № 76 (5). – С. 501-508.
8. Ваганов, В.Е. Современные достижения по получению материалов с нанокристаллической структурой / В.Е. Ваганов, В.А. Кечин, И.А. Евдокимов // Вестник научно-технического развития. – 2010. – № 6 (34). – С. 3-11.
9. Дровосеков, А.Б. Коррозионные свойства и защитная способность химико-каталитических Ni-P покрытий / А.Б. Дровосеков, М.В. Иванов, О.А. Полякова, Т.Е. Цупак // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2011, Том: XIX.– № 4. – С. 41-46.
10. Рева О.В., Михалюк С.А., Урбанович Е.А. Упрочнение деталей аварийно-спасательного оборудования наноструктурированными слоями никель-фосфор // материалы научно-практической конференции «Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности», Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 29 ноября 2012, Екатеринбург.