

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПОРШНЕЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С ПОКРЫТИЕМ НИКЕЛЬ-РЕНИЙ-ФОСФОР

**В. А. Скрябин, М. А. Рейес Альмейда**

В статье приводятся результаты исследований финишной обработки поверхностей поршней из алюминиевых сплавов. Показано, что бесцентровое шлифование и полирование перед покрытием поверхности сплавом никель-фосфор обеспечивает хорошую прочность сцепления сплава с алюминиевой основой, а дальнейшее химическое никелирование и полирование эластичными кругами сплава повышает износостойкость и коррозионную стойкость покрытия.

Полученные результаты внедрены в виде технологии химического осаждения и финишной абразивной обработки защитно-декоративного покрытия сплава никель-рений-фосфор в ООО Объединение «Компрессор» (г. Пенза), что позволило повысить износостойкость и коррозионную стойкость рабочих поверхностей деталей. Экономический эффект от внедрения разработки достигнут путем увеличения ресурса работы в 1,3–1,5 раза.

**Ключевые слова:** финишная обработка, поршни, алюминиевый сплав, бесцентровое шлифование, полирование, покрытие, сплав никель-рений-фосфор, химическое никелирование и полирование, эластичные круги, износостойкость и коррозионная стойкость покрытия.

## TECHNOLOGICAL IMPROVEMENT OF FINISH ABRASIVE TREATMENT OF PISTONS MADE OF ALUMINIUM ALLOYS WITH NICKEL-RHENIUM-PHOSPHORUS COVERAGE

**V. A. Skryabin, M. A. Reyes Almeida**

The authors report the results of finish treatment researches of surfaces of pistons made of aluminium alloys. It is shown that centerless polishing and polishing before coverage of surface with nickel-phosphorus alloy provides good durability of coupling of alloy with aluminium basis, and a chemical nickelage and polishing provide the increase of wearproofness and inoxidizability of coverage with the elastic circles of alloy. Results of the work reflected in the article are inculcated as technology of the chemical besieging and finish abrasive treatment of protective-decorative coverage of alloy nickel-rhenium-phosphorus in. "Compressor" Association LLC (city of Penza), application of which allowed to promote wearproofness and inoxidizability of working surfaces of details. An economic effect from introduction of development is attained by the increase of resource of work in 1,3–1,5 times.

**Keywords:** finish treatment, pistons, aluminium alloys, centerless grinding, polishing, coverage, an alloy is nickel-rhenium-phosphorus, chemical nickelage and polishing, elastic circles, wearproofness and inoxidizability of coverage.

Химическое никелирование находит широкое применение для получения защитно-декоративных и функциональных никель-рений-фосфорных покрытий. Это также перспективный метод формирования различных наноструктур, поскольку в отличие от электроосаждения не требует токоподводов,

металл может осаждаться на электрически изолированные участки нанометровых размеров, что обеспечивает однородность и точность наноструктур. Процессы химического осаждения находят применение во многих областях машино- и приборостроения, в микроэлектронике и нанoeлектронике, а также

© Скрябин В. А., Рейес Альмейда М. А., 2015

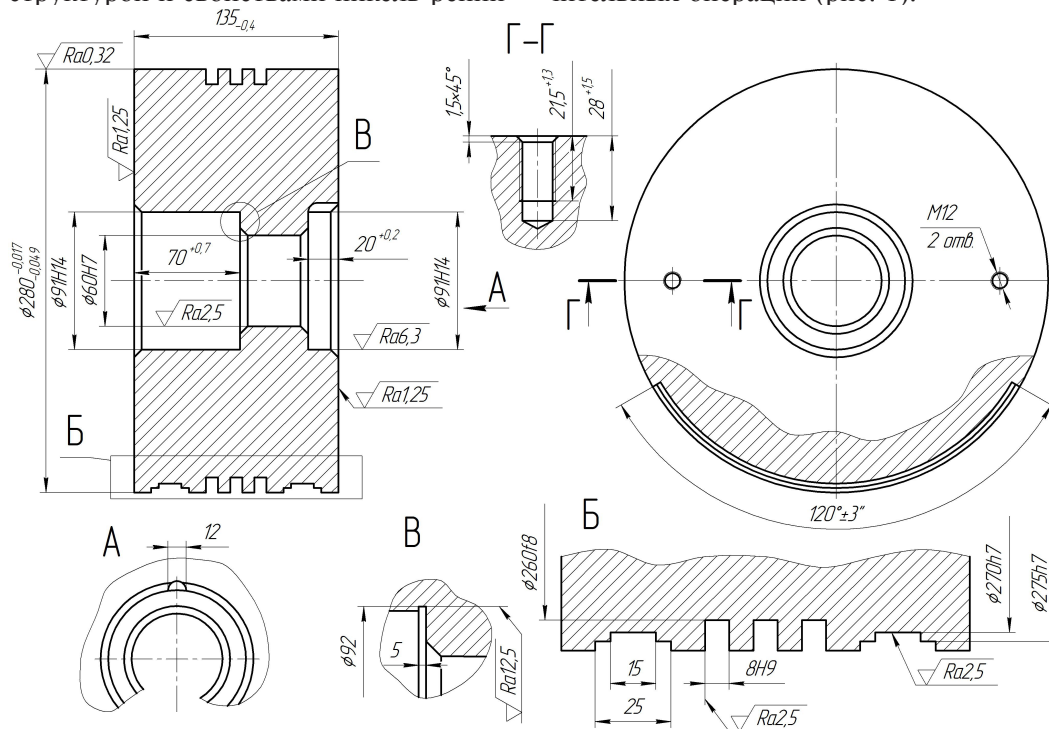
при создании различных микроэлектромеханических систем, где используются для осаждения барьерных слоев, тонких металлических пленок, играющих роль проводников, магнитных пленок.

В настоящее время ряд аспектов, касающийся механизма процесса химического никелирования, остается до конца не выясненным, что затрудняет использование системного подхода для совершенствования процессов осаждения покрытий. В частности, окончательно не выяснен механизм роста никель-рений-фосфорных покрытий. Недостаточно однозначно установлена взаимосвязь между условиями получения, составом, структурой и свойствами никель-рений-

фосфорных покрытий при их абразивной финишной обработке.

В связи с этим изучение влияния технологических параметров абразивной обработки покрытия на состав сплава никель-рений-фосфор с целью получения покрытия с требуемой коррозионной стойкостью и износостойкостью, а также изучение других физико-механических свойств осаждаемых покрытий является актуальной задачей.

Технологический процесс никелирования поршней компрессоров высокого давления из алюминиевых сплавов состоит из подготовительных операций, операций осаждения покрытия и заключительных операций (рис. 1).



Р и с. 1. Поршень компрессора высокого давления

Подготовительные операции преследуют цель обеспечения наиболее высокой прочности сцепления покрытий с металлом деталей. Требуемые свойства покрытий определяются режимами осаждения и окончательной механической обработкой.

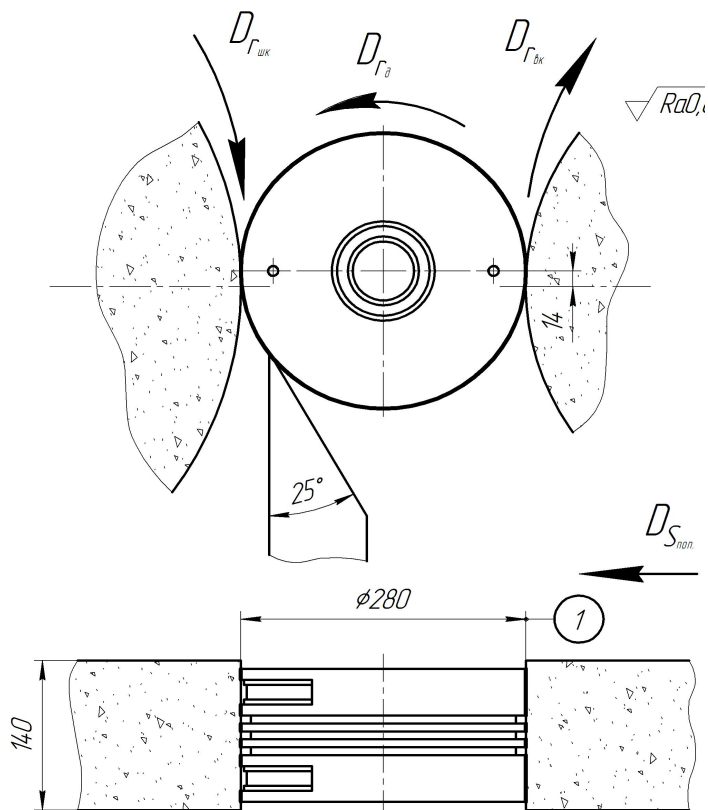
Маршрутный технологический процесс, связанный с обеспечением износостойкости рабочих поверхностей поршней из алюминиевого литейного сплава марки АЛ1 (ГОСТ 2685-75) твердостью 85–90НВ, приведен в таблице.

**Маршрут обработки поверхности поршня под покрытие и самого покрытия**

| № операции | Операция и оборудование   | Содержание операции   |
|------------|---|---|
| 005        | Промывка. Моечная машина НО-3753  | Промыть и очистить поршень  |
| 010        | Дефектовочная   | Выявление отклонений формы и расположения поверхностей, геометрических размеров, осмотр на наличие раковин, трещин, изломов, вмятин на поршне |
| 015        | Бесцентрово-шлифовальная. Полуавтомат круглошлифовальный бесцентровой модели ЗЕ183А | Шлифовать начисто поверхность поршня до шероховатости Ra = 0,8 мкм для нанесения никель-рений-фосфорного покрытия                             |
| 020        | Полировальная. Полировально-шлифовальный станок модели ЗБ854                        | Полировать поверхность поршня до шероховатости Ra = 0,32 мкм для нанесения никель-рений-фосфорного покрытия                                   |
| 025        | Контроль  | Контролировать полученные размеры   |
| 030        | Цинкатная обработка   | Для прочного сцепления химического никеля с алюминием необходимо выполнить предварительную цинкатную обработку поверхности поршня             |
| 035        | Травление   | Снять слой цинка в растворе азотной кислоты   |
| 040        | Цинкатная обработка   | Повторная цинкатная обработка поверхности поршня  |
| 045        | Травление   | Снять слой цинка в растворе азотной кислоты   |
| 050        | Изоляция  | Нанести на места, не подлежащие покрытию, цапон-лак   |
| 055        | Химическое никелирование. Установка для никелирования                               | Никелирование изношенной поверхности юбки поршня слоем покрытия толщиной 150 мкм  |
| 060        | Снятие изоляции   | Удаление изоляционных материалов  |
| 065        | Термическая обработка   | Снятие внутренних напряжений после никелирования  |
| 070        | Полировальная предварительная. Полировально-шлифовальный станок модели ЗБ854        | Полировать эластичными кругами поверхности юбки поршня до шероховатости Ra = 0,63 мкм   |
| 075        | Полировальная окончательная. Полировально-шлифовальный станок модели ЗБ854          | Полировать эластичными кругами поверхности юбки поршня до шероховатости Ra = 0,32 мкм   |
| 080        | Промывка. Моечная машина НО-3753  | Мойка и очистка поршня от изоляции  |
| 085        | Контроль  | Контроль толщины покрытия и полученных размеров   |

Бесцентровое шлифование способом поперечной подачи (способом врезания) осуществляется поперечной подачей ведущего круга по направлению к шлифуемому кругу. Перед этим де-

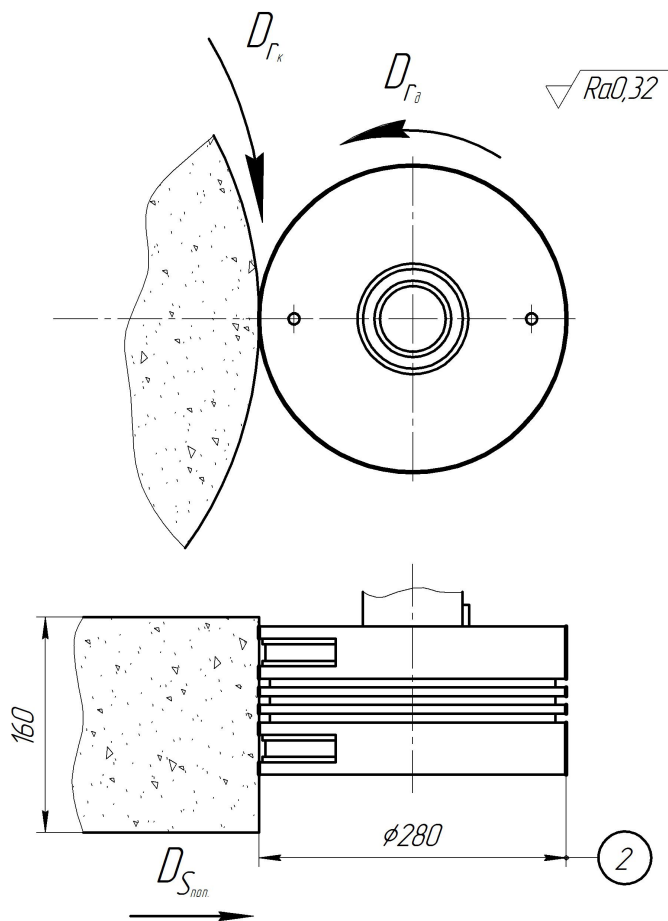
таль укладывается на опору сверху или сбоку. По окончании шлифования, когда детали достигнут необходимого размера, ведущий круг отводится, деталь снимается и закладывается новая (рис. 2).



Р и с. 2. Схема бесцентрового шлифования поршня методом врезания

Для бесцентрового шлифования наружной поверхности поршня были выбраны следующие режимные параметры: глубина резания  $t = 0,015$  мм, подача шлифовального круга  $s_1 = 0,001$  мм на один оборот детали, а подача ведущего круга  $s_2 = 0,003$  мм на один оборот детали. Частоты вращения шлифовального и ведущего кругов приняты соответственно  $n_1 = 2\ 886$  мин<sup>-1</sup>, а  $n_2 = 200$  мин<sup>-1</sup>. Скорость резания  $V = 10$  м/с. Бесцентровое шлифование обеспечивает  $Ra = 0,8$  мкм. Марка шлифовального круга: круг шлифовальный

1 300 × 32 × 127 ГОСТ Р 52781-2007, а ведущего круга – круг шлифовальный 1 300 × 32 × 127 ГОСТ Р 52781-2007. Параметры шлифовального круга: марка 64С (карбид кремния зеленый), зернистость 25–16 (F60–F90), твердость СМ1, связка керамическая (К). Применяемая смазочно-охлаждающая жидкость при бесцентровом шлифровании – Аквол 6 (2–10%-ный водный раствор). После операции бесцентрового шлифования поршень полируют на полировально-шлифовальном полуавтомате (рис. 3).



Р и с. 3. Схема полирования поршня

Полирование – это процесс обработки материалов до получения зеркального блеска поверхности. Задачей процесса полирования является устранение следов предшествующей обработки и различных поверхностных неровностей (штрихов, царапин, неглубоких раковин и других дефектов) с целью получения гладкой поверхности, обладающей высокой способностью к отражению света. Различные объяснения механизма процесса полирования можно свести к следующим трем направлениям:

– *механическое полирование*, когда механизм процесса объясняется съемом неровностей профиля с поверхности слоя, а ход процесса – такими меха-

ническими свойствами материала как твердость и пластичность;

– *физическое полирование*, когда основными причинами, определяющими процесс полирования, считают температуру плавления и теплопроводность полируемого материала;

– *химическое полирование*, когда процесс полирования объясняется в основном съемом оксидных пленок, постоянно образующихся под действием окружающей среды.

Основываясь на практических наблюдениях, можно заключить, что процесс полирования представляет собой комплекс механических, физических, электрических и химических явлений,

которые тесно взаимосвязаны и раздельно изменяются в большую или меньшую сторону в зависимости от рода полируемого материала, полировального инструмента, режимов обработки и внешней среды.

Наиболее широко применяется полирование при подготовке поверхностей под гальванические и химические покрытия, а также для придания деталям блеска после нанесения покрытия. Этого можно достичь и другими методами обработки, такими как хонингование, доводка, суперфиниширование, но эти процессы требуют специального, достаточно сложного оборудования, правильно подобранных инструментов и режимов и оправдывают себя лишь в том случае, когда кроме качества обработанной поверхности требуется обеспечить и заданную точность. Именно поэтому для улучшения внешнего вида обработанных поверхностей широкое распространение получило полирование, так как оно выполняется на очень простых станках, причем полировальный инструмент легко можно сделать в любых условиях из войлока, кожи, ткани и других материалов. Линейный съем металла при полировании, как правило, составляет 0,01–0,03 мм.

Полированием обрабатывают любые металлы и сплавы различной твердости – от сплавов алюминия до закаленной и нержавеющей стали и чугуна. Различают два вида полирования: *черновое* (предварительное) и *чистовое* (окончательное). Черновое полирование используется для механического удаления неровностей поверхности с помощью свободных (незакрепленных) или закрепленных посредством клея абразивных зерен на рабочей поверхности эластичных кругов и лент. Чистовое полирование осуществляется свободными мелкозернистыми абразивными порошками или мягкими эластичными кругами и лентами с нанесенными на них тонкими полировальными пастами.

В зависимости от формы обрабатываемой поверхности полировальные

круги приходится точить и профилировать. В единичном производстве профилирование, как правило, производят вручную. Так как эта операция требует высокой квалификации рабочего и небезопасная, ее применять не рекомендуется. Профилирование целесообразно осуществлять шлифовальным кругом, имеющим профиль, обратный профилю обрабатываемого полировального круга. Во время полирования круги зернистостью 50–25 с открытой структурой вращаются навстречу друг другу и при сближении шлифовальный круг снимает все неровности с полировального, придавая ему требуемую форму.

После точения и профилирования на рабочую поверхность полировального круга наносят абразивные зерна и закрепляют их методом накатки в следующем порядке: новые круги, еще не бывшие в работе, несколько раз грунтуют клеевым раствором, давая просохнуть каждому слою клея; затем проклеенную поверхность смазывают еще одним слоем раствора и сразу же вручную или на специальных станках накатывают абразивные зерна, подогретые до  $t$  40–45°C. Накатывание может быть однослойным и многослойным. При многослойном накатывании каждый последующий слой наносят после просыхания предыдущего. На войлочные и фетровые круги первый слой накатывают с применением мездрового клея, а последующие – жидкого стекла. На хлопчатобумажных кругах первый слой зерна можно закреплять и жидким стеклом, так как ткань хорошо с ним сцепляется. На бумажных кругах абразивное зерно закрепляют с помощью силикатного клея. Накатанные круги сушат в естественных или искусственных условиях.

Полирование деталей из цветных сплавов с исходной шероховатостью поверхностей  $R_a = 2,5$  мкм при требуемой  $R_a = 0,08$  мкм производится за три операции:

*грубое полирование* до  $R_a = 1,25$ – $0,63$  мкм осуществляют хлопчатобумажными кругами, накатанными зеленым

карбидом кремния зернистостью 12–8 и черным зернистостью 25–6 (F60–F90) для меди, и 12–10 (F100–F120) – для латуни;

*предварительное полирование* до  $R_a=0,63–0,32$  мкм производят войлочными или хлопчатобумажными кругами, накатанными электрокорундом зернистостью 6–4 (F180–F220) для сплавов алюминия и никеля, черным карбидом кремния зернистостью 12–8 (F100–F150) для меди и 6–5 (F180–F220) для латуни;

*окончателное полирование* до  $R_a=0,32–0,08$  мкм осуществляется кругами с пастой на основе окиси хрома для сплавов алюминия и никелевых сплавов и на основе окиси железа и глинозема для медных сплавов и латуни.

Практически припуск на полирование составляет от 0,12 до 0,3 мм. Наиболее распространенным инструментом для шлифования служат круги различной твердости из войлока или другого материала, на которые с помощью клеевой связки наносят абразив. Чем меньше твердость материала, тем эластичнее должен быть абразивный круг, применяемый для его обработки. Сильно профилированные детали, независимо от твердости материала, рекомендуется обрабатывать мягкими (эластичными) кругами. При полировании эластичным кругом, покрытым пастой или суспензией, существенное влияние оказывает *контактное давление полировальника* на обрабатываемую поверхность. С увеличением давления интенсивность процесса полирования повышается до некоторых пределов, а в дальнейшем превышение оптимальной величины давления не только снижает качество обработки, но и производительность, так как преждевременно изнашивается полировальник и наблюдается заметный нагрев обрабатываемых деталей.

При выборе величины контактного давления учитываются свойства полируемого материала. Полирование твердых материалов ведут с большими удельными давлениями полировального

круга на обрабатываемую поверхность по сравнению с мягким материалом. Чем мягче материал, тем легче снять слой металла, но тем сложнее достичь однородности штриха. В ряде случаев этот режим обработки субъективно оценивается тем, кто производит полирование. Так, например, когда требуется удалить большой слой, полируемую деталь с большим усилием прижимают к полировальнику. В этом случае процесс полирования протекает интенсивнее, но при этом изделие сильно нагревается и качество поверхности снижается.

При полировании различают суммарную силу резания полировальным кругом  $P_z$  и силу резания-царапания единичным зерном. В результате проведенных однофакторных экспериментов получаем следующую эмпирическую зависимость для определения силы резания  $P_z(H)$  при полировании:

$$P_z = C_{pz} \times V_d^{0,9} \times S_p \times t^{0,5}, \quad (1)$$

где  $C_{pz}$  – коэффициент, характеризующий условия резания для конкретной марки материала полируемой детали;  $V_d$  – скорость обрабатываемой детали;  $S_p$  – поперечная подача полировального круга на деталь,  $t$  – глубина полирования [1; 4–5].

Для примера рассчитаем силу резания при полировании поршня из алюминиевого сплава войлочным кругом при  $C_{pz} = 15$ ,  $V_d = 15$  м/мин,  $S_p = 0,001$  мм/об,  $t = 0,01$  мм:  $P_z = 15 \times 15^{0,9} \times 0,01 \times 0,01^{0,5} \approx 0,225$  Н.

Контактное давление при полировании определяется следующим образом:

$$p = \frac{P_z}{F}, \quad (2)$$

где  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания;  $F$  – среднее мгновенное сечение слоя, снятого всеми абразивными зёрнами.

В соответствии с работами [1; 4–5]  $F$  определяется по следующей зависимости:

$$F = \frac{V_d}{60 \times V_K} \times t \times S_p, \quad (3)$$

где  $V_d$  – скорость вращения детали, м/мин;  $V_K$  – скорость вращения круга, м/с. Принимая в соответствии со справочными данными  $V_K = 20$  м/с,  $V_d = 15$  м/мин,  $t = 0,01$  мм и  $S_p = 0,001$  мм/об, получим  $F = 1,25 \times 10^{-3}$  м<sup>2</sup>. Рассчитаем контактное давление полировального круга на деталь:

$$p = \frac{0,225}{1,25 \times 10^{-3}} = 180 \text{ Н/м}^2 = 0,018 \text{ МПа.}$$

Сравнение полученных данных с результатами экспериментальных исследований контактного давления при полировании деталей из алюминиевых сплавов а также с литературными данными показало, что они изменяются в диапазоне 0,01–0,04 МПа, что свидетельствует о достаточной точности предложенной методики расчета. После нанесения покрытия никель-рений-фосфор оно полировалось на полировальном станке с аналогичными режимными параметрами. При этом глубина полирования  $t = 0,03$  мм. В процессе заключительной финишной механической обработки деталей из алюминиевых сплавов перед химическим покрытием в них возникают внутренние остаточные напряжения, влияющие на прочность сцепления покрытия с материалом основы. Предварительно можно оценить эти напряжения и деформации на примере упрощенной модели детали – полом цилиндре.

При заданной обработке поверхностей поршней компрессора высокого давления из алюминиевых сплавов напряжения и деформации в окружном направлении определяются из различных решений уравнения в частных производных:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \times \left( \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \right) = 0. \quad (4)$$

Уравнение для определения относительной деформации материала в окружном направлении имеет вид:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} \sigma_\theta, \quad (5)$$

где  $\sigma_\theta$  – компонента напряжения в окружном направлении.

Для алюминиевых сплавов усредненное значение модуля упругости  $E$  составляет величину порядка  $0,7 \times 10^5$  МПа. Согласно исследованиям Ю. В. Суворова, Н. Г. Олсон и С. И. Алексеева, для деталей из алюминиевых сплавов  $\varepsilon_\theta$  изменяется в диапазоне 0,09–0,1 %. В этом случае остаточные напряжения находятся в диапазоне 40–50 МПа.

Для получения качественных покрытий рекомендовано обработку деталей полировать войлочными кругами при рациональных режимах и с подачей СОТС. В качестве СОТС применялись масляные эмульсии, масло или сжатый воздух. В этом случае температура в поверхностном слое металла не превышает 420–470 К, а следовательно, на обрабатываемых поверхностях нет прижогов, микротрещин и других деформаций.

Физико-механические характеристики формируются при полировании эластичными кругами под влиянием двух факторов: силового и температурного. Происходит изменение структур, микротвердости и остаточных напряжений поверхностного слоя деталей.

При рациональных режимах полирования температура в зоне резания не достигает критических температур фазовых превращений и в поверхностном слое возникают остаточные сжимающие напряжения при глубине их распространения до 10–20 мкм. Прочность поверхностного слоя может повыситься на 15–20 % (В. Д. Шкуприй, Т. М. Мендебав, Е. М. Таскенов).

На основании выполненных исследований выбраны режимы финишной обработки поверхностей деталей из алюминиевых сплавов перед никель-ре-



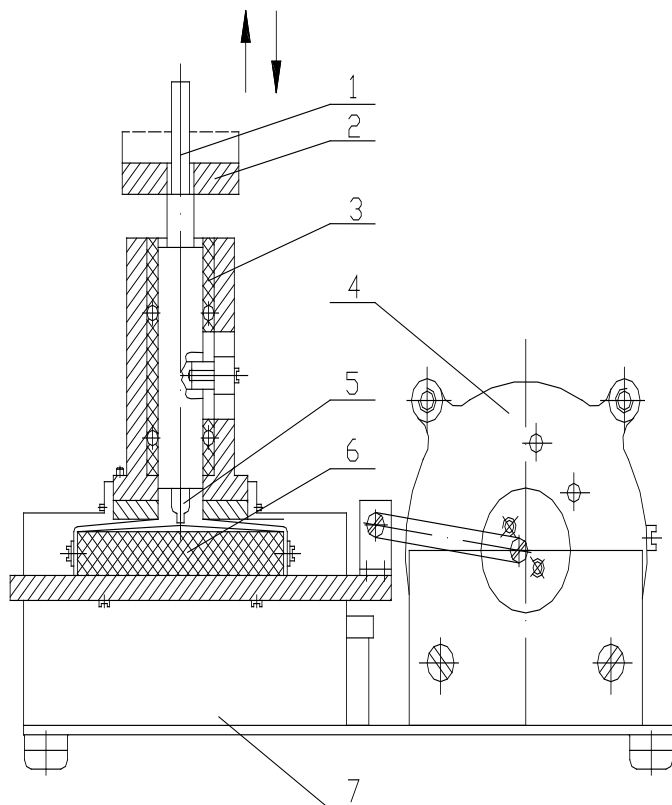
ний-фосфорным химическим покрытием, позволяющие обеспечить заданную шероховатость поверхности по критерию  $R_a$ . Остаточные напряжения сжатия поверхностного слоя, обрабатываемого полированием деталей, и двукратная цинкатная обработка, как показали экспериментальные исследования [2–4], приводят к увеличению прочности сцепления материала основы с химическим покрытием никель-рений-фосфор.

Проверка на износостойкость покрытий показала, что никелированный образец изнашивался почти в 20 раз меньше, чем без покрытия. Общая потеря массы пары трения «АЛ1-Ni-Re-P-покрытие» почти в 24 раза меньше, чем пары «АЛ1-АЛ1». Исследование изно-

стойкости покрытия проводилось весовым методом при различной контактной нагрузке на установке, показанной на рис. 4. Трущаяся пара представляет собой цилиндр из алюминиевого сплава с бронзовым наконечником диаметром 0,8 мм и образец с покрытием. Образец с покрытием совершает возвратно-поступательное движение, и под действием наконечника исследуемое покрытие истирается. Сила трения определялась при помощи граммометра Г10-5, коэффициент трения рассчитывался по следующей формуле:

$$f = F/P,$$

где  $F$  – сила трения, Н;  $P$  – нагрузка, Н.



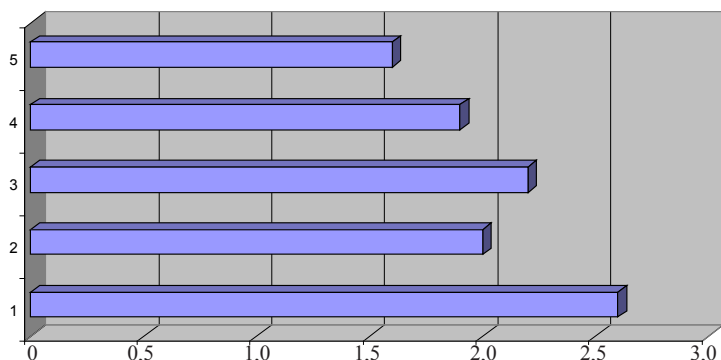
Р и с. 4. Схема установки для испытания покрытия на износостойкость: 1 – стержень; 2 – гири; 3 – сепаратор; 4 – электродвигатель марки РД – 09; 5 – наконечник; 6 – образец с покрытием; 7 – основание прибора

Сначала испытывался образец с необработанным покрытием. При нагрузке на контакт 0,98 Н и силе трения 0,137 Н коэффициент трения составлял 0,14, а износ составлял 2,3 мг. При испытании образца с покрытием после обработки коэффициент трения составлял 0,12 ( $F = 0,115\text{Н}$ ), износ – 1,9 мг.

Образец при испытании закреплялся на лотке, который совершал

возвратно-поступательные движения относительно бронзового наконечника диаметром 1 мм, давящего на образец с силой 2 Н. Износ определялся до проявления основы.

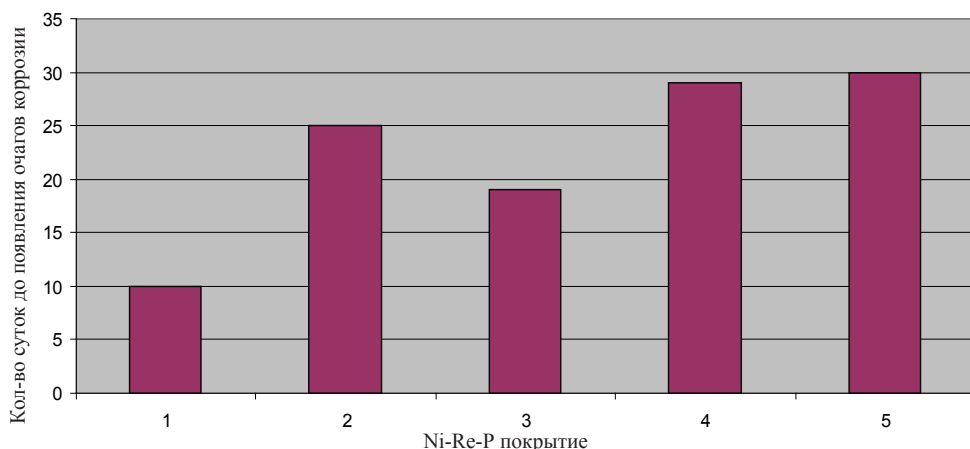
На рис. 5 представлены полученные результаты экспериментальных данных по износостойкости никель-рений-фосфорных покрытий.



Р и с. 5. Весовой износ покрытий никель-фосфор за 25 ч, мг: 1 – покрытие *Ni-Re-P* из кислого раствора с 10 % *P*; 2 – покрытие *Ni-Re-P* с 10 % *P*; 3 – покрытие *Ni-Re-P* с 5 % *P*; 4 – покрытие *Ni-Re-P* с 10 % *P* после однократного полирования; 5 – покрытие *Ni-Re-P* с 10 % *P* после двукратного полирования (5–10% *P*-процентное содержание фосфора в растворе).

Добавка небольших количеств перената калия в раствор *Ni-Re-P* для химического никелирования обеспечивает возможность получения покрытий,

существенно повышающих коррозионную стойкость. Это показали испытания образцов в «тропической» камере (рис. 6).



Р и с. 6. Испытания образцов в «тропической» камере (относительная влажность 98 %,  $t = 40^\circ\text{C}$ ): 1 – покрытие *Ni-Re-P* кислого раствора с 10 % *P*; 2 – покрытие *Ni-Re-P* с 10 % *P*; 3 – покрытие *Ni-Re-P* с 5 % *P*; 4 – покрытие *Ni-Re-P* с 10 % *P* после однократного полирования; 5 – покрытие *Ni-Re-P* с 10 % *P* после двукратного полирования.

Таким образом, после механической обработки никель-рений-фосфорных покрытий износостойкость и коррозионная стойкость повышаются в среднем на 12–15 %. Это явление объясняется уменьшением силы трения после механической обработки, что связано с увеличением площади соприкосновения трущихся поверхностей. После никелирования производилась термическая обработка в течение 2,0–2,5 ч при 200–220°C для снижения внутренних напряжений.

Для придания восстановленной поверхности исходной шероховатости в качестве завершающих операций при-

меняли предварительное полирование до  $R_a = 0,63$  мкм и окончательное полирование эластичными кругами до  $R_a = 0,32$  мкм.

Результаты работы внедрены в виде технологии химического осаждения и финишной абразивной обработки защитно-декоративного покрытия сплава никель-рений-фосфор в ООО Объединение «Компрессор» (г. Пенза). Это позволило повысить износостойкость и коррозионную стойкость рабочих поверхностей деталей. Экономический эффект от внедрения разработки достигнут путем увеличения ресурса работы в 1,3–1,5 раза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Маслов, Е. Н. Теория шлифования металлов : учебник / Е. Н. Маслов. – Москва, 1980. – 350 с.
2. Рейес Альмейда, М. А. Напряженно-деформированное состояние поршней автотракторной техники из алюминиевых сплавов после механической обработки перед никель-фосфорным покрытием / А. Г. Схиртладзе [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2011. – № 4. – С. 2–5.
3. Рейес Альмейда, М. А. Совершенствование технологии никелирования деталей из алюминиевых сплавов / А. Г. Схиртладзе [и др.] // Технология металлов. – № 8. – 2012. – С. 39–42.
4. Скрыбин, В. А. Совершенствование технологии никелирования деталей из алюминиевых сплавов / В. А. Скрыбин, М. А. Рейес Альмейда // Машиностроитель. – 2013. – № 3. – С. 48–53.
5. Ящерицын, П. И. Теория резания : учебник / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. – Минск : Вышэйш. шк., 1990. – 512 с.

Поступила 18.09.2014 г.

Об авторах:

**Скрыбин Владимир Александрович**, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет», доктор технических наук, профессор (Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), [vs\\_51@list.ru](mailto:vs_51@list.ru)

**Рейес Альмейда Максим Антонович**, аспирант кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет» (Россия, г. Пенза, ул. Красная, д. 40), [max-reyes@yandex.ru](mailto:max-reyes@yandex.ru)

Для цитирования: Скрыбин, В. А. Совершенствование технологии обработки поршней из алюминиевых сплавов с покрытием никель-рений-фосфор / В. А. Скрыбин, М. А. Рейес Альмейда // Вестник Мордовского университета. – 2015. – Т. 25, № 1. – С. 59–70. DOI: 10.15507/VMU.025.201501.059

## REFERENCES

1. Maslov E. N. Teoriya shlifovaniya metallov: uchebnik [Theory of grinding of metals: Tutorial]. Moscow, 1980, 350 p.
2. Reyes Almeida M. A., Skryabin V. A., Skhirtladze A. G., Pimenova O. V., Svechnikova G. I. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie porshney avtotraktornoy tekhniki iz aluminievyykh splavov posle mekhanicheskoy obrabotki pered nikel-fosfornym pokrytiem [Stressed-strained state of pistons of automotive made of aluminium alloys after mechanical processing to nickel-phosphorus coverage]. *Remont, vosstanovlenie, modernizaciya* – Repair, restoration, modernization. 2011, no. 4, pp. 2–5.

3. Reyes Almeida M. A., Skhirtladze A. G., Skryabin V. A., Karasev N. Ia. Sovershenstvovanie tekhnologii nikelirovaniya detaley iz alyuminievykh splavov [Improvement of technology of nickel plating of details made of aluminium alloys]. *Tehnologija metallov* – Metal Technology. 2012, no. 8, pp. 39–42.

4. Skryabin V. A., Reyes Almeida M. A. Sovershenstvovanie tekhnologii nikelirovaniya detaley iz alyuminievykh splavov [Improvement of technology of nickel plating of details made of aluminium alloys]. *Mashinostroitel'* – Mechanician. 2013, no. 3, pp. 48–53.

5. Yashcheritsyn P. I., Eremenko M. L., Feldsteyn E. E. Teoriya rezaniya: uchebnik [Cutting theory: tutorial]. Minsk, Vyshjeshaja Shkola Publ., 1990, 512 p.

*About the authors:*

**Skryabin Vladimir Aleksandrovich**, professor of Machine Engineering Technology chair of Penza State University (40, Krasnaya Str., Penza, Russia), Doctor of Sciences degree holder in Engineering sciences, vs\_51@list.ru

**Reyes Almeyda Maksim Antoniovich**, post-graduate student of Machine Engineering Technology chair of Penza State University (40, Krasnaya Str., Penza, Russia), max-reyes@yandex.ru

*For citation:* Skryabin V. A., Reyes Almeida M. A. Sovershenstvovanie tekhnologii obrabotki porshney iz alyuminievykh splavov s pokrytiem nikel-reniy-fosfor [Technological improvement of finish abrasive treatment of pistons made of aluminum alloys with nickel-rhenium-phosphorus coverage]. *Vestnik Mordovskogo Universiteta* – Mordovia University Bulletin. 2015, vol. 25, no. 1, pp. 59–70. DOI: 10.15507/VMU.025.201501.059