

Ф.Х. Бурумкулов\*, В.И. Иванов\*\*, С.А.Величко\*\*\*, П.А.Ионов\*\*\*, С.П. Сульдин\*\*\*

## ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОНАСОСОВ ТИПА НШ-У ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАР ТРЕНИЯ

*\*ГосНИТИ,*

*1-й Институтский пр., 1, г. Москва, 109248, Россия*

*\*\*НПФ «Техноинвест»,*

*бул. Траян, 21/3, офис 121, MD-2060, г. Кишинев, Республика Молдова*

*\*\*\*Институт механики и энергетики МГУ им. Н.П. Огарева,*

*ул. Российская, 5, п. Ялга, г. Саранск, 430000, Республика Мордовия, Россия*

### Введение

В гидросистемах тракторов и сельскохозяйственных машин используются овалынные шестеренные гидронасосы типа НШ-У (НШ-10У, НШ-32У, НШ-46У, НШ-50У и т.д.) с объемной подачей жидкости от 6 до 100 см<sup>3</sup>/об, при номинальном давлении 10–14 МПа (рис. 1).

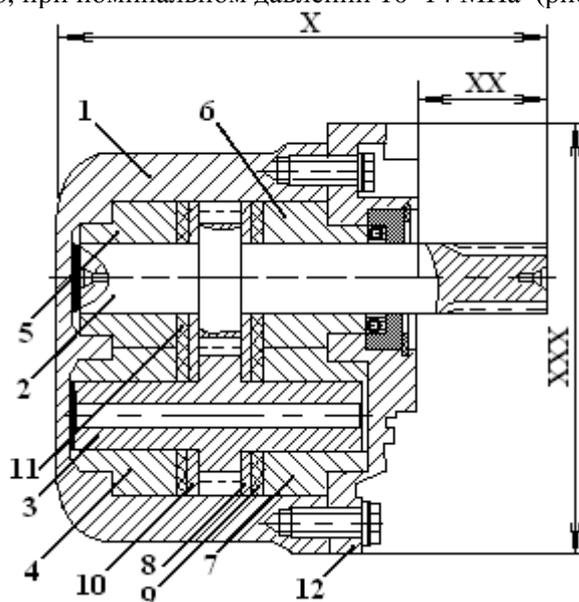


Рис. 1. Устройство насоса НШ-У: 1 – корпус; 2 – ведущий вал - шестерня; 3 – ведомый вал - шестерня; 4, 5, 6, 7 – втулки; 8, 10 – компенсаторы; 9, 11 – уплотнения компенсаторов; 12 – крышка

Гидронасосы являются слабым звеном гидросистемы машин и их вероятность отказа на 20–40% больше, чем у других гидроагрегатов [1].

При работе насоса торцевые поверхности шестерен интенсивно трутся о компенсаторы в масляно-абразивной среде, что приводит к появлению кольцеобразных рисок на торцах шестерен и поверхностях компенсаторов.

Под действием высокого давления и износа соединений валы–втулки шестерни прижимаются к корпусу со стороны заборной полости, и гидроабразивное изнашивание сопровождается трением вершин зубьев шестерен о внутренние поверхности колодцев. В результате происходит зонное изна-

шивание колодцев корпуса и вершин зубьев шестерен.

Основными сопряжениями, лимитирующими ресурс насоса, являются цепочка шестерни–втулки–компенсаторы, образующая торцевой зазор; головка зубьев шестерен и корпус, образующие радиальный зазор. Кроме этого, на утечку жидкости, следовательно, на ресурс насоса существенное влияние оказывает зазор в сопряжении цапфа–втулка.

Цель работы – иллюстрация возможности электроискрового легирования металлических поверхностей как инструмента, обеспечивающего повышение ресурса изделия.

#### **Методика эксперимента**

Оценка состояния насосов после рядовой эксплуатации проводилась стендовым испытанием 60 насосов по стандартной программе. Испытания показали, что у 90% насосов объемный КПД меньше допустимого предела, равного 0,65.

Испытанные насосы разбирались, а затем проводились дефектация и измерения износов деталей. Результаты микрометражных исследований позволили выявить слабые сопряжения, к которым относятся цапфа шестерни–подшипник и торец шестерни–компенсатор.

Установлено также, что рост зазора в соединении корпус–шестерня является следствием увеличения зазора в соединении цапфа шестерни–подшипник. Поэтому для повышения ресурса насосов необходимо, в первую очередь, снизить коэффициент трения и интенсивность изнашивания в этом соединении.

В основу технологии повышения надежности отремонтированных гидронасосов положены восстановление и упрочнение параметров изношенных поверхностей деталей электроискровым легированием по схеме: 1 – нанесение на корпус; 2 – нанесение на торцы шестерен насосов; 3 – нанесение на цапфы вала–шестерни; 4 – нанесение на вершины зубьев шестерен; 5 – упрочнение компенсаторов торцевого уплотнения.

Электроискровое нанесение и легирование осуществляли в воздухе на модернизированных установках «Элитрон-22БМ» и «Элитрон-21БМ», изготовленных на опытном заводе ИПФ АН Республики Молдова и модернизированных во ВНИИТУВИД РАСХН [2].

В качестве электродов (катода) для наплавки использовались стали У10, 85 и Св08, бронза БрАЖ 3-1-1, алюминиевый сплав Ал 11, никель. Для упрочнения – баббит Б-16.

Методика исследований заключалась в определении зависимостей толщины нанесенного слоя  $h$ , сплошности  $C_{пл}$  и микротвердости покрытия  $H_{\mu}$  от энергии единичного искрового разряда  $W$ , продольной подачи электрода  $S_{эл}$ , частоты вращения образца (детали)  $n_d$ , диаметра электрода  $d_{эл}$ . Качество поверхностного слоя оценивалось с помощью микроскопа МИМ-7, микротвердость образцов измерялась на приборе ПМТ-3.

Кинетику процесса эрозии электрода оценивали гравиметрическим способом, а формирование упрочненного слоя – гравиметрическим способом и профилографированием [3].

Триботехнические испытания сопряжений с легированными рабочими поверхностями проводили на установках 20СМТ-1 и ХОБАТ-1/2 [2] по ГОСТ 23.224-86.

Измерение микротвердости легированной поверхности осуществляли на специальной установке, оснащенной прибором ПМТ-3, используя нагрузку 50 г и время нагружения 3 с. Выполняли не менее восьми замеров равномерно по всей площади покрытия.

#### **Теоретические и экспериментальные работы**

Поиск рациональных технологических режимов механизированного электроискрового легирования (ЭИЛ) изношенной цапфы шестерен связан с требованием обеспечить необходимую толщину нанесенного слоя  $h$  и его микротвердость  $H_{\mu}$ . Функции  $h$  и  $H_{\mu}$  зависят от многих переменных, которые носят как качественный, так и количественный характер:

$$h; H_{\mu} = f(S_{эл}, m, d_{эл}, n_d, n_{эл}, M_d, M_{эл}, W, q \dots), \quad (1)$$

где  $S_{эл}$  – подача электрода;  $m$  – число проходов электрода;  $d_{эл}$  – диаметр электрода;  $n_d$ ;  $n_{эл}$  – число оборотов в минуту детали (образца) и электрода соответственно;  $M_d$ ,  $M_{эл}$  – материал детали и электрода соответственно;  $W$  – энергия единичного искрового разряда;  $q$  – удельное давление электрода на катод.

Параметры  $S_{эл}$ ,  $d_{эл}$ ,  $n_d$ ,  $n_{эл}$ ,  $W$ ,  $q$  имеют размерный характер, а остальные – качественный и безразмерный.

Для конкретных фиксированных значений параметров  $m$ ,  $M_d$ ,  $M_{эл}$ ,  $n_{эл}$ ,  $q$  функция (1) может быть записана в виде

$$h; H_{\mu} = f(S_{эл}, d_{эл}, n_d, W). \quad (2)$$

Как следует из формулы (2), определяющими факторами толщины и микротвердости нанесенного слоя для конкретных сочетаний материалов электрода и детали являются подача и диаметр электрода, частота вращения детали, а также энергия единичного искрового разряда.

Для определения степени влияния каждого фактора на толщину и качество нанесенного покрытия использованы методы статистического моделирования, математической моделью которых является преобразованное уравнение (2) в виде

$$\begin{aligned} Ln h &= b_0 Ln + b_1 Ln S_{эл} + b_2 Ln d_{эл} + b_3 Ln n_d + b_4 Ln W; \\ Ln H_{\mu} &= b_0 Ln + b_1 Ln S_{эл} + b_2 Ln d_{эл} + b_3 Ln n_d + b_4 Ln W. \end{aligned} \quad (3)$$

Для определения коэффициентов уравнения (3) использовался полный факторный эксперимент типа  $2^4$ .

Оптимизация полученных математических моделей позволяет выбрать область технологических режимов электроискрового легирования цапф шестерен, при которой одновременно выполняются следующие условия:

- толщина нанесенного слоя  $h \geq h_n$ ;
- микротвердость слоя  $H_{\mu} \rightarrow \max$ ,

где  $h_n$  – необходимая нормативная толщина слоя металлопокрытия.

Окончательный выбор режимов из технологически приемлемых осуществляется по результатам триботехнических испытаний.

Результаты микрометражных исследований позволили установить диапазоны толщин слоя покрытия  $h_n$ , которое нужно нанести, чтобы восстановить параметры изношенных поверхностей. С учетом припуска на механическую обработку диапазон толщин покрытия для восстановления цапф шестерен составляет 31–184 мкм, а для колодцев корпуса – 61–330 мкм. По данным ранее проведенных исследований, нижний предел сплошности электроискрового покрытия  $C_{пл}^*$  должен составлять 70%.

Установлено также, что рост зазора в соединении корпус–шестерня является следствием увеличения зазора в соединении цапфа шестерни–подшипник. Поэтому для повышения ресурса отремонтированных насосов необходимо снизить интенсивность изнашивания в восстанавливаемом соединении цапфа шестерни–подшипник.

Так, например, многофакторным корреляционным, дисперсионным и регрессионным анализом установлено, что математическая модель связи толщины слоя покрытия, нанесенного на изношенные поверхности цапф шестерен, с выбранными технологическими режимами электроискровой обработки имеет следующий вид:

$$h = \frac{119 \cdot W^{(0,254-0,073 \ln n_d - 0,042 d_{эл})} \cdot S_{эл}^{(0,086 \ln d_{эл} - 0,0128)}}{n_d^{(0,09 \ln d_{эл} - 0,077)} \cdot d_{эл}^{(0,66 - 0,019 \ln S_{эл} \cdot n_d \cdot d_{эл})}} \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что на толщину покрытия существенно влияют энергия единичного искрового разряда  $W$ , продольная подача электрода  $S_{эл}$ , частота вращения детали  $n_d$ , диаметр электрода  $d_{эл}$ , парные взаимодействия  $W$  и  $S_{эл}$ ,  $W$  и  $d_{эл}$ ,  $S_{эл}$  и  $d_{эл}$ , а также  $W n_d S_{эл} d_{эл}$ . Таким образом, члены модели (5) по значимости эффектов располагаются следующим образом:  $d_{эл}$ ,  $S_{эл} d_{эл}$ ,  $W d_{эл}$ ,  $n_d d_{эл}$ ,  $W$ ,  $W n_d S_{эл} d_{эл}$ ,  $W d_{эл}$ ,  $n_d$ ,  $S_{эл}$ .

Модель влияния факторов с двойной связью на микротвердость слоя имеет следующий вид:

$$H_{\mu} = \frac{5415 \cdot W^{(0,044-0,017 \ln d_{эл})} \cdot n_d^{(0,011 \ln d_{эл} - 0,011)}}{S_{эл}^{(0,012+0,01 \ln d_{эл})} \cdot d_{эл}^{(0,011+0,01 \ln S_{эл} + 0,147 \ln d_{эл} \cdot S_{эл} \cdot n_d)}} \quad (6)$$

Оценка коэффициентов значимости показала, что наибольшее влияние на микротвердость покрытия оказывают энергия единичного искрового разряда  $W$ , продольная подача электрода  $S_{эл}$ , частота вращения детали  $n_d$ , диаметр электрода  $d_{эл}$  и сочетание факторов  $W d_{эл}$ ;  $S_{эл} d_{эл}$ ;  $n_d d_{эл}$  и  $W S_{эл} n_d d_{эл}$ .

Корреляционный анализ показывает, что дисперсия параметров оптимизации на 95,73% для толщины и на 92,18% для микротвердости определяет факторы, включенные в исследования.

Для выбора электродов и оптимизации технологических режимов ЭИЛ восстановления и упрочнения корпуса насоса по критериям (4)–(6), изготовленного из сплава АЛ-11, в качестве материала катодов (образец детали) использовали АЛ-11, а анода – АЛ-11. Катод изготовлен в виде пла-

стины с площадью поверхности  $30 \text{ см}^2$ . Аноды, обрабатываемые электроды, имели цилиндрическую форму с площадью торцевой поверхности  $15 \text{ мм}^2$ . Результаты целевых экспериментов по оценке кинетики изменения толщины, микротвердости и сплошности покрытия в зависимости от времени обработки показаны на рис. 2.

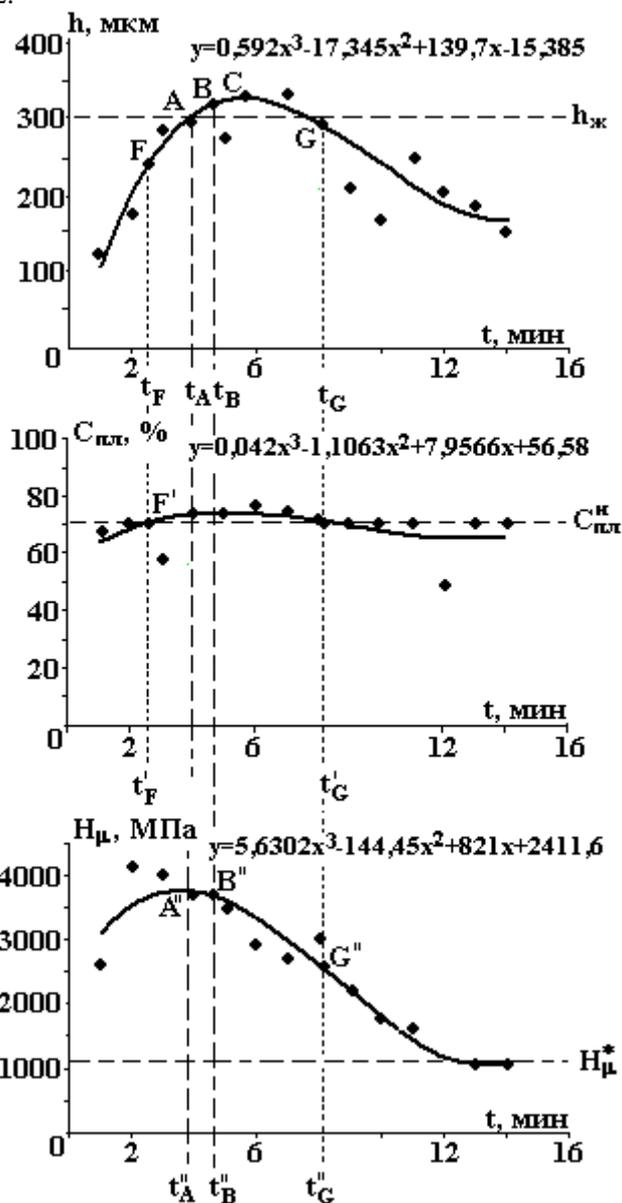


Рис. 2. Влияние энергетических режимов и материала электрода на толщину  $h$ , сплошность  $C_{пл}$  и микротвердость  $H_{\mu}$  сформированного слоя (электрод – АЛ-11, образец – сплав АЛ-11),  $P = 5$ ,  $\omega_s = 250 \text{ Гц}$ )

### Обсуждение результатов экспериментов

Условия критерия (5) выполняются в интервале А-В. Заштрихованной области соответствуют рациональные технологические режимы ЭИЛ установки «Элитрон-22БМ»: режим – 5 ( $I = 3,8 \text{ А}$ ,  $W = 1,66 \text{ Дж}$ ); частота вибрации электрода  $f = 250 \text{ Гц}$ ; время обработки  $1 \text{ см}^2 t_{ог} = 8 \text{ мин}$ .

Выбор электродов и режимов электроискрового легирования проводился путем построения экспериментальных графиков изменения параметров покрытия в зависимости от времени обработки [2].

Для восстановления не менее 75% корпусов необходимо нанести однослойное покрытие электродом АЛ-11 толщиной не менее 300  $\mu\text{м}$ .

Толщина слоя выше  $h \geq h^H = 300 \text{ мкм}$  находится на отрезке А-Г с абсциссами  $t_A$ ,  $t_G$ . Необходимая сплошность покрытия  $C_{пл} > C_{пл}^H = 70\%$  достигается на участке F'-G'. Максимальной микро-

твердости  $H_{\mu}$  покрытия отвечает отрезок А"–В". Следовательно, трем критериям отвечает длительность обработки  $t_A$ , район точки А, который и принимается за оптимальный режим обработки.

Микротвердость покрытия в рабочей зоне на колодце корпуса, нанесенного электродом АЛ-11,  $H_{\mu}^{p.3.} = 2237$  МПа, а из никеля  $H_{\mu}^{p.3.} = 3589$  МПа (исходная  $H_{\mu} = 1401$  МПа). Установлено, что по глубине зоны соединения микротвердость полученных покрытий снижается.

Для восстановления не менее 90% корпусов наносится двухслойное покрытие: первый слой электродом из никеля на четвертом режиме установки «Элитрон-22БМ» с частотой импульса 250 Гц, а второй слой электродом из АЛ-11 на пятом режиме с частотой импульса 250 Гц.

Прочность сцепления покрытия с основой на сдвиг для покрытия из сплава АЛ-11  $\tau = 40,85$  МПа, что близко к прочности на сдвиг исходного материала.

Наплавка на вершины зубьев проводилась на установке «Элитрон-22БМ» на третьем или четвертом режиме электродами из сталей 85 и 65 Г с частотой импульса 200–220 Гц. Время обработки зависит от необходимой толщины и сплошности покрытия.

Стендовые и эксплуатационные испытания насосов с восстановленными и упрочненными корпусами и восстановленными головками шестерен показали, что их гидроабразивная стойкость выше, чем у новых пар трения.

Оптимизация математических моделей (5) и (6) с целью выполнения условия (4) позволила определить рациональные технологические режимы ЭИО цапф шестерен (сталь 18ХГТ):

– наибольшая толщина наплавленного слоя металлопокрытия ( $h = 192$  мкм) достигается на следующих режимах: электрод – сталь 85, энергетический режим генератора «Элитрон-22Б» – Р–5 (рабочий ток  $I = 3,8$  А, энергия разряда  $W = 1,66$  Дж),  $S_{эл} = 1,31$  мм/мин,  $n_d = 11,5$  мин<sup>-1</sup>,  $d_{эл} = 3,5$  мм.

– наибольшая микротвердость нанесенного слоя ( $H_{\mu}^{p.3.} = 5844$  МПа) покрытия достигается на следующих режимах: электрод – сталь 85, режим – 5 ( $I = 3,8$  А,  $W = 1,66$  Дж),  $S_{эл} = 1,11$  мм/мин,  $n_d = 11,9$  мин<sup>-1</sup>,  $d_{эл} = 3,46$  мм.

При восстановлении поверхности цапф шестерен (сталь 18ХГТ) электродом из стали 85 наибольшая толщина нанесенного слоя достигается на следующих режимах: рабочий ток  $I = 3,8$  А, энергия разряда  $W = 1,66$  Дж, продольная подача электрода  $S = 1,31$  мм/мин, частота вращения обрабатываемой детали  $n = 11,5$  мин<sup>-1</sup>, диаметр электрода – 3,5 мм.

После электроискрового нанесения поверхность подверглась поверхностной пластической деформации шариком  $\phi 4$  мм усилием 150 Н при частоте вращения детали  $n_d = 11,2$  об/мин, продольной подачи электрода  $S_{эл} = 0,19$  мм/об, числе проходов электрода по поверхности детали  $m = 1$ .

Микротвердость в рабочей зоне  $H_{\mu}^{p.3.} = 5586$  МПа (исходная  $H_{\mu} = 4497$  МПа). Наибольшая микротвердость  $H_{\mu}^{p.3.} = 5844$  МПа достигается на режимах: рабочий ток  $I = 3,8$  А, энергия разряда  $W = 1,66$  Дж, продольная подача электрода – 1,11 мм/мин, частота вращения обрабатываемой детали – 11,9 мин<sup>-1</sup>, диаметр электрода – 3,46 мм.

Экспериментальные исследования показали, что лучшим электродом для упрочнения отверстия подшипника (алюминиевый сплав АО3-1) является электрод Б16 (Sp – 15–17%, Cu – 1,5–2,0%, Sn – 15–17%, остальное – Pb). Оптимальным режимом упрочнения является:  $I = 0,4$  А,  $W = 0,13$  Дж,  $f = 200$  Гц, длительность упрочнения  $t_{смк} = 3$  мин.

Исследование упрочненных подшипников, изготовленных из алюминиевого сплава АО-3, электродом из баббита Б16 показало, что на поверхности формируется слой глубиной около 30 мкм со средней микротвердостью  $H_{\mu}^{6с} = 2500$  МПа (исходная  $H_{\mu} = 1044$  МПа).

Согласно металлографическим исследованиям для всех покрытий первый слой в основном состоит из окислов и частично из металла обрабатывающего электрода; второй слой – из нетравящегося белого слоя и термодиффузионной зоны – подслоя.

В результате экспериментальных исследований по выбору электродов и рациональных технологических режимов для получения антифрикционного слоя на торцах шестерен насосов выяснилось, что наилучшие триботехнические характеристики пар трения получаются при следующих условиях: электрод – медь М1, режимы обработки: напряжение – 100 В, емкость накопительных конденсаторов – 30 мкФ, частота вибрации  $\omega_3 = 400$  Гц, время обработки  $t_{об} = 3$  мин. Сплошность нанесенного слоя составляет 80–90%.

В качестве последующей механической обработки восстановленных поверхностей деталей применяется притирка с использованием эльборовых пасты ЛП зернистостью М3-М2 ГОСТ 9206-80.

Результаты триботехнических исследований пар трения сталь 18ХГТ – алюминиевый сплав АО3-1 и 18ХГТ + сталь 85 – АО3-1 + баббит Б16 показаны на рис. 3.

Наглядно видно, что коэффициент трения у восстановленной пары в 1,13–1,19 раза меньше, нагрузка до заедания в 1,17 раза выше, а интенсивность изнашивания в 5,7–7,3 раза ниже, чем у новой пары трения.

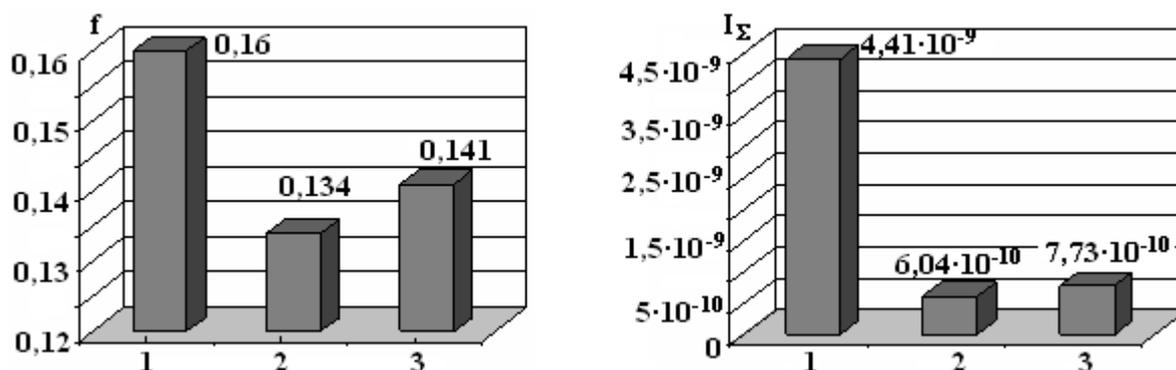


Рис. 3. Коэффициент трения  $f$  и суммарная интенсивность изнашивания  $I_{\Sigma}$  исследуемых пар трения. 1 – 18ХГТ – АО3-1 (эталонный образец); 2 – 18ХГТ + сталь 85 – АО3-1 + баббит Б16 при максимальной толщине слоя; 3 – 18ХГТ + сталь 85 – АО3-1 + баббит Б16 при максимальной микротвердости слоя

Эксплуатационные испытания отремонтированных с использованием электроискровых технологий гидронасосов показали, что за период работы с 2001 г. по настоящее время брака агрегатов не зафиксировано.

Нижняя доверительная граница прогнозируемого среднего ресурса составляет 5600 часов, что превышает нормативный средний ресурс серийных агрегатов.

#### Заключение

1. Электроискровое легирование является эффективным инструментом для нанесения покрытий до 350 мкм и упрочнения рабочих поверхностей деталей, обеспечивающих повышение надежности агрегатов.

2. Разработан и внедрен в производство новый энергоресурсосберегающий технологический процесс для ремонта овального шестеренного гидронасоса класса НШ-У, обеспечивающий не менее 140% ресурс после ремонта, в результате чего удалось сократить долю выбраковываемых агрегатов не менее чем на 30%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нилов Н.И. Методические рекомендации по технологии ремонта гидравлической аппаратуры. М., 1988.
2. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов. Саранск, 2003.
3. ГОСТ 23.224-86. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей.

Поступила 27.04.05

#### Summary

Results of research on increase of reliability of units, by improvement of physicomechanical properties of working surfaces of interfaces by electrospark processing in the gas environment, a compact electrode are submitted. Properties of coverings of the details formed on surfaces from aluminium, copper and alloyed steels are investigated. It is shown, that optimization of process of electrospark processing creates steams of friction pairs friction with high weared out the properties essentially raising reliability of the unit.