

На правах рукописи



Акопов Енок Юрьевич

**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДОВ
ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА ПОГРУЖНЫХ
ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ**

Специальность 05.05.06 – «Горные машины»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"

Научный руководитель: Шахова Кира Ивановна
доцент, кандидат технических наук.

Официальные оппоненты:

- Лагунова Юлия Андреевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Горные машины и комплексы», ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»;

- Соловьев Валентин Георгиевич, кандидат технических наук, директор ООО «Торговый дом «Трансбелт»

Ведущая организация – ОАО НПО «ГИДРОМАШ» (г. Москва)

Защита диссертации состоится «___» _____ 2017 года в ___ часов на заседании диссертационного совета Д212.132.15 при ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС» по адресу: **119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, стр.2, ауд. А-305.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС» и на сайте www.old.misis.ru

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: **119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, НИТУ «МИСиС», Горный институт, к/п 586.**

Автореферат разослан «___» _____ 2017 года.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета
канд. тех. наук, профессор



ШЕШКО
Евгения Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Разработка месторождений полезных ископаемых подземным и открытым способами в подавляющем большинстве случаев сопровождается поступлением воды в горные выработки. Известно, что при больших отборах жидкости из скважин, погружные центробежные насосы наиболее экономичны и наименее трудоемки при их обслуживании по сравнению с компрессорными насосами других типов.

Создание и повышение ресурса отдельных узлов деталей приведены в работах таких ученых как: Коваль П.В., Картавый Н.Г., Малашкина В.Л., Чебаевский В.Ф., Овсянин Б.В., Михайлов А.К., Трубаров А.П., Карелин В.Я., Попов В.М.

Сравнительно невысокий ресурс отечественных насосов обусловлен, прежде всего, большой интенсивностью изнашивания поверхностных слоев рабочих колес и их низкой усталостной прочностью. Кроме того, ресурс рабочего колеса в 1.5-2 раза ниже ресурса других деталей насоса (вала, корпуса, цилиндра), что предопределяет их разноресурсность и снижает эффективность эксплуатации. Так на замену наиболее нагруженного рабочего колеса насоса требуется около 500 нормо-часов рабочего времени, что приводит к простоям дорогостоящего оборудования. Поэтому выбор и обоснование методов повышения ресурса погружных центробежных насосов является актуальной научной задачей.

Целью работы является установление зависимости ресурса погружного центробежного насоса от износостойкости рабочих поверхностей колеса и его усталостной прочности для разработки методов его повышения, что позволит увеличить эффективность процесса отбора жидкости из скважин.

Идея работы заключается в повышении ресурса погружных центробежных насосов путем увеличения износостойкости рабочего колеса борированием поверхностных слоев и его усталостной прочности магнитно-импульсной обработкой за счет создания остаточных сжимающих напряжений.

Научные положения, выносимые на защиту, и их новизна:

1. Зависимость ресурса рабочего колеса погружного центробежного насоса от износостойкости поверхностного слоя, особенность которой состоит в том, что она позволяет определить твердость и глубину упрочняющего борированного слоя для повышения ресурса.

2. Способ повышения усталостной прочности рабочего колеса насоса, новизна которого заключается в создании сжимающих напряжений магнитно-импульсной обработкой.

3. Параметры процессов борирования поверхностного слоя и магнитно-импульсной обработки рабочего колеса погружного центробежного насоса, отличаются тем, что они обеспечивают повышение ресурса не менее чем в два раза.

Задачи исследования:

1. Анализ работы погружных центробежных насосов и их основных частей.

2. Исследование возможности повышения характеристик литых деталей погружных центробежных насосов.

3. Изучение влияния химического состава рабочей поверхности погружного центробежного насоса на величину износа и выбор упрочняющего элемента.

4. Отработка технологии поверхностного упрочнения рабочего колеса погружного центробежного насоса, методом химико-термической обработки, повышающей их износостойкость.

5. Определение режимов магнитно-импульсной обработки литых деталей погружного центробежного насоса, увеличивающих усталостную и статическую прочность.

Обоснованность и достоверность результатов исследований подтверждаются представленным объемом экспериментальных данных по износостойкости и ресурсу рабочих колес насосов и хорошей их сходимостью с теоретическими результатами исследований. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 5-7%.

Научное значение работы заключается в установлении зависимостей ресурса погружного центробежного насоса от износостойкости поверхности и усталостной прочности рабочего колеса; в разработке методов повышения износостойкости поверхностей и усталостной прочности рабочего колеса; в обосновании параметров борирования и магнитно-импульсной обработки для повышения ресурса.

Практическое значение работы заключается в создании технологии повышения износостойкости литых деталей насоса и увеличения их усталостной прочности и разработке на этой основе технических параметров по повышению ресурса насоса. Испытания, проведенные в ОАО НПО «Гидромаш» и ООО «Завод «Спецмонтажконструкция», подтвердили результаты работы.

Реализация результатов работы. Технологический регламент повышения износостойкости рабочих поверхностей колес насоса борированием, усталостной прочности магнитно-импульсной обработкой для повышения ресурса насоса использован в ОАО НПО «Гидромаш» и ООО «Завод «Спецмонтажконструкция» при изготовлении насосов серии ЦВА и ЦНА.

Результаты исследований используются в учебном процессе в НИТУ "МИСиС" при подготовке студентов по специальности 151001 – «Технология машиностроения» и 150402 – «Горные машины и оборудование».

Апробация работы. Основные положения и содержание работы были доложены на международной научно-технической конференции «Неделя горняка» (МГГУ, 2008, 2012), на международном научно-техническом семинаре «Прогрессивные сборочные процессы в машиностроении» (ВолгГТУ, 2009).

Публикации. По теме диссертации опубликовано три статьи в изданиях, рекомендованных требованиям ВАК Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав заключения, и одного приложения, содержит 165 страниц, 51 рисунок, 16 таблиц, список литературы из 128 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, сформулированы цель, идея и научные положения, выносимые на защиту, дана оценка научной и практической значимости работы, приведены результаты ее реализации.

В первой главе рассмотрены технические и эксплуатационные параметры погружных центробежных насосов, которые имеют от 80 до 500 и более ступеней.

Разработка месторождений полезных ископаемых подземным и открытым способом в подавляющем большинстве случаев сопровождается поступлением воды в горные выработки. Вода может поступать непосредственно из разрабатываемого горного массива, если он обводнен, или содержать в себе обводненные участки (водоносные горизонты). Кроме того, возможно поступление в горные выработки поверхностных вод из рек и различных водоемов, а также в виде атмосферных осадков.

Выявлены основные элементы насоса, которые подвергаются максимальному износу и имеют минимальный ресурс. Проанализированы особенности конструкции насосов и двигателей, производящихся в России, условия их эксплуатации в агрессивной среде при повышенной температуре в течение нескольких месяцев без осмотра и профилактических ремонтов.

На основе анализа работы 205 погружных центробежных насосов выявлены причины отказов основных элементов и установлено, что большинство отказов связано с износом и разрушением рабочих поверхностей колеса. Рабочее колесо при эксплуатации в сравнении с другими конструктивными элементами насоса испытывает максимальный уровень циклических нагрузок, связанных с одновременным воздействием на него сил, возникающих при вращении и сопутствующих колебаниях, а также от нагрузок при взаимодействии рабочих поверхностей со скважинной жидкостью.

Установлено, что корпус насоса служит от 4 до 5 лет, вал насоса, головки и кабель - от 3 до 4 лет, а срок службы рабочего колеса и аппарата направляющего не превышает 1,5 -2 лет.

Выявлено, что основным видом изнашивания рабочего колеса является гидроабразивное изнашивание. Наряду с гидроабразивным износом, детали погружных центробежных насосов подвержены так же коррозионно-механическому и усталостному изнашиванию. Это приводит сначала к изменению поверхностных структурных состояний, а при более сильных воздействиях и к объемным необратимым структурным деформациям вплоть до разрушения.

Среда, с которой взаимодействуют рабочие колеса в горных выработках и в шахтах, может быть охарактеризована как многокомпонентная система сложного состава, которая включает в себя водные растворы, твердые и газообразные компоненты.

Ученый С.П. Козырев установил, что гидроабразивное изнашивание происходит главным образом в результате удаления пластически выдавленного металла из лунок, образованных ударом абразивных частиц.

Износ рабочего колеса проявляется в потере его массы в местах интенсивного контакта потока жидкости по поверхности переднего и заднего дисков, входных и выходных кромок лопаток. При снижении напора до критического, масса рабочего колеса снижается от 10 до 15 % за время нормальной эксплуатации. Это время работы и принимается за технический ресурс рабочего колеса (см. Рисунок 1).

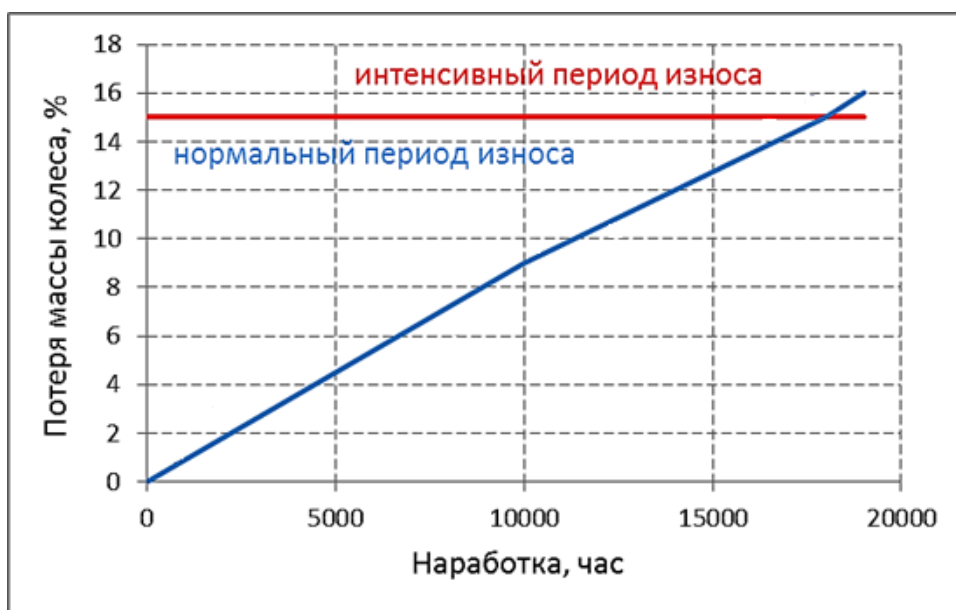


Рисунок 1 - Зависимость ресурса рабочего колеса погружного центробежного насоса от износа

Необходимо отметить, что ресурс рабочего колеса, более чем в два раза меньше ресурса других основных элементов насоса. Разноресурсность различных элементов и отсутствие кратности, соответствующей ремонтным срокам, приводят к существенному снижению эффективности эксплуатации погружных центробежных насосов.

Определена наработка на отказ 205 погружных центробежных насосов (ЦН), из которых 173 ЦН были с рабочими колесами из чугуна, 19 ЦН - с рабочими колесами из полиамида, 13 ЦН - с рабочими колесами из нерезиста. Кроме того, установлено, что срок службы рабочего колеса и аппарата направляющего не превышает 1,5 -2 лет.

Значительное влияние на ресурс оказывает качество изготовления деталей насоса. Геометрическая сложность деталей насоса определяет необходимость их изготовления с помощью литья или порошковой металлургии. Литейная технология является более дешевой по сравнению с порошковой, но нуждается в совершенствовании для придания необходимых свойств поверхности. В настоящее время детали рабочих органов изготавливаются из серого чугуна путём литья в землю. При этом основным видом брака при литье является наличие поверхностных дефектов в виде пор и каверн (см. Рисунок 2) в широком диапазоне



Рисунок 2 - Дефекты при литье

размеров, что связано с технологическими параметрами литья и использованием формовочных и отделочных смесей, не обеспечивающих высокую газопроницаемость, и отсутствие пригаров. Из-за дефектов поверхностного слоя, как правило, и начинается разрушение материала, особенно в тех случаях, когда деталь работает в жестких режимах и агрессивных средах.

Металлы, твердость которых выше твердости абразивов, разрушаются в следствии цикловой усталости от переформирования поверхностного слоя при многократном воздействии абразивных частиц. При этом металл с поверхности отслаивается и выкрашивается.

Таким образом, рабочее колесо является элементом в конструкции, который лимитирует основные эксплуатационные параметры насоса. Поэтому повышение ресурса насоса в целом необходимо проводить, в первую очередь, за счет снижения интенсивности изнашивания поверхностей рабочего колеса и увеличения его усталостной прочности.

Во второй главе обоснованы теоретические подходы к выбору метода повышения ресурса колеса за счет снижения интенсивности изнашивания его рабочих поверхностей. Этого можно добиться, прежде всего, на этапе изготовления рабочих колес.

Исследования технологии получения, структуры и свойств литейного чугуна – материала рабочих колес показали, что получение той или иной структуры чугуна в отливках зависит от многих факторов: качества исходных шихтовых материалов – чушковых чугунов и ферросплавов (химический и фракционный состав, наличие шлаковых и других инородных включений); технологии плавки; режима модифицирования; скоростей кристаллизации и охлаждения расплавов в форме, а, следовательно, от толщины стенки отливки и теплофизических свойств материала формы. При этом геометрические параметры чугунных отливок определяются качеством изготовления литейной формы и условиями её заливки.

В диссертации рассмотрены особенности литейных технологий изготовления чугуна. Прежде всего, были исследованы возможности перехода от серого чугуна к

высокопрочному чугуна с шаровидным графитом. В результате исследований установлено, что замена пластинчатой формы графита на шаровидную позволяет не только в 2-3 раза увеличить прочность и пластичность чугуна, но и существенно повысить его коррозионно-абразивную стойкость.

Для расчета износа базовых рабочих колес, изготовленных из чугуна с твердостью 500МПа, предложена формула расчета массового износа:

$$\Delta\sigma = \frac{k \cdot \alpha_1 \cdot \rho_a \cdot \rho_M \cdot B \cdot n \cdot \tau \cdot V_0^3 \cdot (1 - l_1^2)}{\eta \cdot g \cdot \pi \cdot D \cdot H_M}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ - массовый износ образца; k - коэффициент пропорциональности; α_1 - коэффициент, учитывающий пространство между частицами; ρ_a и ρ_M - плотность соответственно абразивной частицы и изнашиваемого материала; B - объем ударяемой воды; n - содержание абразивных частиц в воде; τ - продолжительность испытаний; V_0 - скорость соударения абразивных частиц; l_1 - коэффициент восстановления при упругом пластическом ударе; g - ускорение свободного падения; D - диаметр окружности по которой вращаются образцы; H_M - твердость изнашиваемого материала.

Указанное выражение справедливо и для структурно-однородных материалов. Присутствие дефектов изнашиваемых поверхностей уменьшает межатомные связи и интенсифицирует процесс изнашивания.

Для расчета линейного износа лопастей рабочих колес, изготовленных из чугуна, предложена формула:

$$\Delta S = \frac{k \cdot f(P_1 \cdot D_r \cdot C) \psi \cdot \beta \cdot \rho_M \cdot \omega^3 \cdot t}{2 \cdot \gamma_M \cdot H_M}, \quad (2)$$

где, k -коэффициент пропорциональности; f - коэффициент, учитывающий пространство между частицами; P_1 - концентрация гидросмеси; ω - относительная скорость потока; D_r –размер канала; C - коэффициент лобового сопротивления частицы; ψ - коэффициент, учитывающий число контактов; β - коэффициент подобия; ρ_M - плотность материала; γ_M – удельный вес изнашиваемого материала; H_M -

твердость материала; t - время испытаний; l - расстояние между частицами; N - количество частиц; q - объем твердой частицы.

Анализ формулы расчета массового износа показывает, что износ поверхности рабочих колес и сопротивление металла гидроабразивному изнашиванию на прямую зависит от твердости поверхностного слоя (см. Рисунок 3), которая определяется химическим составом, структурой и режимами термической обработки.

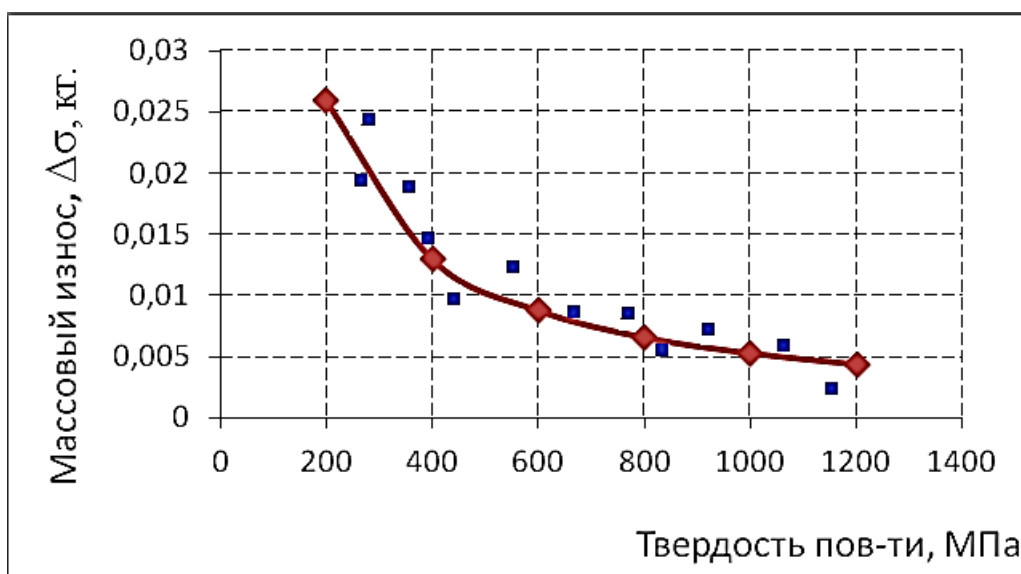


Рисунок 3 - Зависимость износа от твердости поверхности

Из данной зависимости следует, что минимальный износ достигается при твердости поверхности 1000-1200 МПа. Для обеспечения такой твердости были рассмотрены следующие методы поверхностного упрочнения материалов: с образованием твердого слоя нового состава на поверхности базового материала; с модернизацией химического состава и структуры поверхностного слоя; с изменением структуры и энергетических параметров поверхностного слоя; с изменением шероховатости поверхностного слоя; с изменением структуры по всему объему металла - объемная модификация структуры.

Для расчета линейного износа поверхности рабочих колес, изготовленных из чугуна, предложена формула:

$$\Delta S = \frac{P_1 \cdot \psi \cdot \beta \cdot \rho_T \cdot \omega^2 \cdot l \cdot q \cdot N}{2 \cdot \gamma_M \cdot H_M}, \quad (3)$$

Анализ формул (2) и (3), так же показал, что износ поверхности рабочих колес на прямую зависит от твердости поверхностного слоя.

Наряду с выше перечисленными методами, рассмотрены технологии обработки поверхности, которые приобретают особый смысл с точки зрения трибологии и их влияние на трение, износ и смазку в процессе взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении: процесс микродугового оксидирования; нанесение антикоррозионного полимерного покрытия из порошкового материала; финишная антифрикционная безабразивная обработка; графитирование поверхностей деталей; механо-термическое формирование износостойких покрытий.

Из перечисленных методов по совокупным качествам (простота, надежность, распространенность) выделены жидкофазные технологии и химико-термическая обработка (далее ХТО). Анализ этих методов повышения износостойкости позволил заключить, что наиболее перспективным является применение метода ХТО с последующей модификацией структуры.

Как следует из анализа данных наибольшее влияние на износ материала оказывают В (бор) и С (углерод) (см. Рисунок 4).

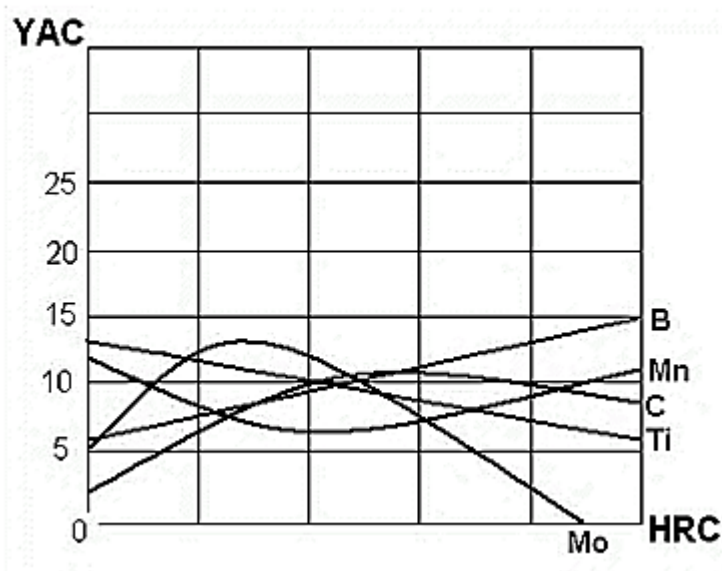


Рисунок 4 - Зависимость абразивного износа (YAC) от твердости (HRC)

Для обоснования метода повышения ресурса рабочего колеса проведен анализ зависимости влияния углерода, бора, хрома, марганца на износостойкость. Приведенные ниже зависимости влияния концентрации химического элемента на

коэффициент износостойкости (см. Рисунок 5) показывают, что наличие бора в химическом составе оказывает наибольшее влияние на повышение износостойкости. Кроме того, бор повышает износостойкость при всех концентрациях, углерод и хром при концентрации до 6%, а молибден снижает износостойкость. Обработка данных проведена методами математической статистики при среднеквадратичном отклонении от 0,96 до 0,99.

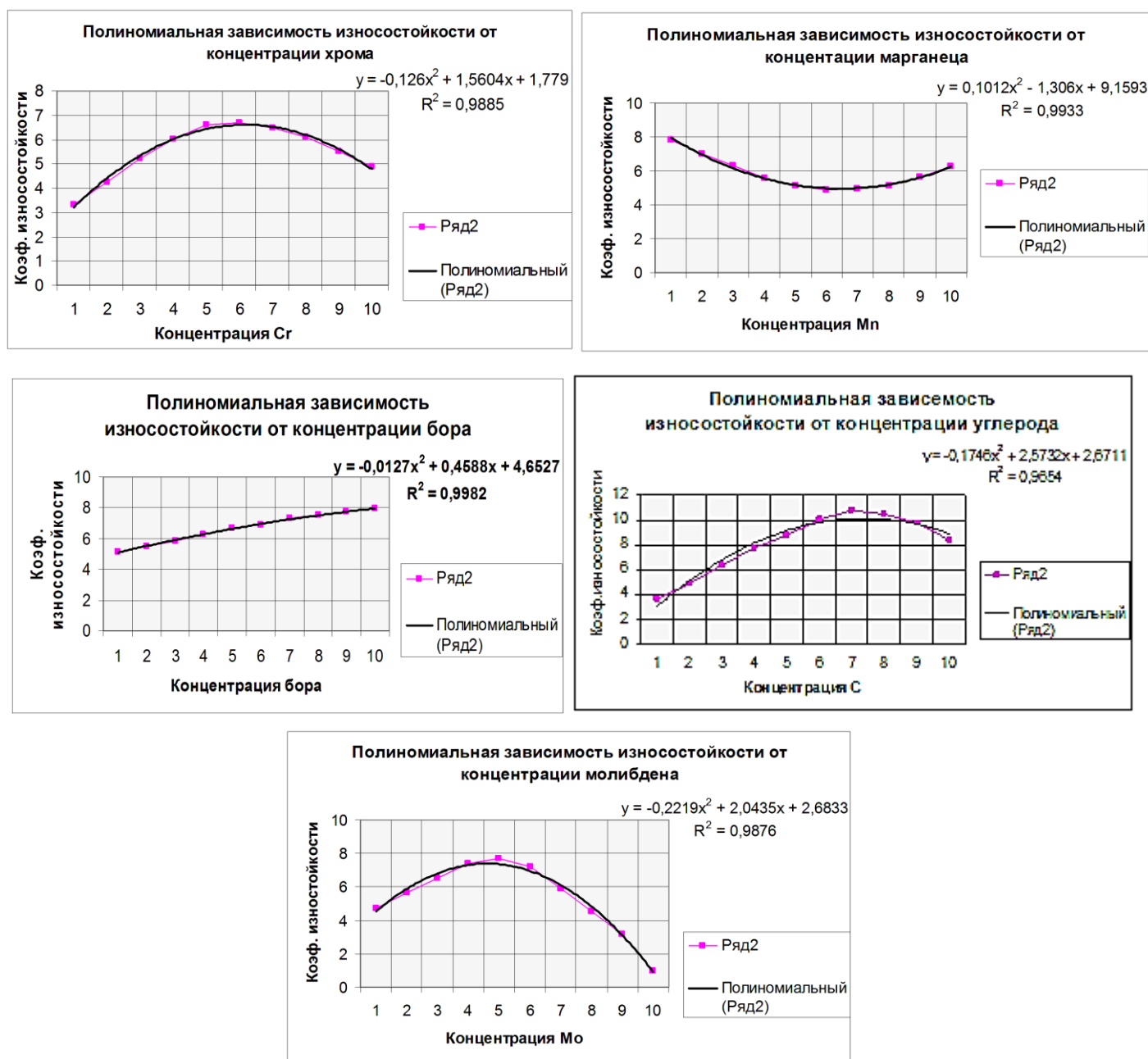


Рисунок 5 - Зависимости коэффициента износостойкости от концентрации бора, хрома, марганца и углерода

Исследованиями влияния хрома на износостойкость белого чугуна с содержанием около 4% марганца установлено, что наивысшую (на 20-25% выше чем у чугуна) износостойкость имеет чугун с содержанием 17-22% хрома. Несмотря на дальнейший рост твердости, после повышения содержания хрома вследствие увеличения и коагуляции карбидов хрома цементитного типа, износостойкость чугуна уменьшается, поскольку увеличивается ферритная составляющая в матрице металла. Марганец способствует стабилизации аустенита в белых чугунах, поэтому с увеличением его содержания в хромистом чугуне твердость снижается вследствие увеличения остаточного аустенита в основе металла, износостойкость сплава при этом также уменьшается.

Бор, имеющий минимальный атомный размер, легче диффундирует в сплавы, а боридный поверхностный слой обладает более высокой твердостью по сравнению с насыщением его другими элементами, что обеспечивает и наибольшую износостойкость поверхности. Однако, существующие в настоящее время технологии борирования, не позволяют получить упрочненный слой глубиной более 0,5 мм, что не позволяет проводить последующую механическую обработку.

Для увеличения глубины борирования предложено проводить борирование при литье, где температура достигает 1500°C. Повышение температуры процесса насыщения увеличивает диффузию и, следовательно, позволяет получить слой большей глубины с твердостью свыше 1000 МПа (см. Рисунок 6).

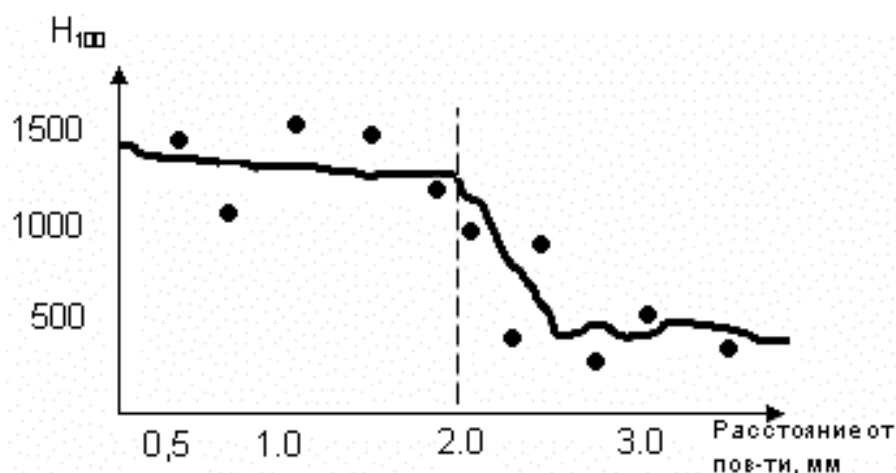


Рисунок 6 - Изменение твердости от глубины борированного слоя

Оценка глубины слоя проверялась по значениям микротвердости H_{100} (см. таблицу 1). Для получения достоверных данных измерения проводились при измерениях на 5 дорожках, разброс составлял не более H_{100} 150 МПа. Максимальные и минимальные значения отбрасывались.

Таблица 1

Микротвердость модифицированного слоя	
Структурные составляющие	Твердость H_{100} , МПа
Борированный слой	1145, 1324, 1315, 1005, 1145
Темные участки внутри боридной эвтектики	447, 447, 508, 586, 447

В основе разработанной в диссертации интегрированной технологии (ИТ) лежит метод нанесения карбида бора на внутреннюю поверхность литейной формы. Карбид бора обладает исключительно высокой химической стойкостью в различных агрессивных средах, не взаимодействует с кислотами, является высокоабразивным тугоплавким материалом (температура плавления 2300°C). Данный химический продукт устойчив до температуры 1000°C , а по твердости карбид бора опережает электрокорунд, карбид кремния SiC , и выступает третьим после алмаза и кубонитрида бора.

В качестве состава многокомпонентной жидкофазной композиции (МЖК) применялся этилсиликат и дисперсный порошок карбида бора. Формовка образцов осуществлялась вручную, а формы изготавливали из песка с жидким стеклом. Формы высушивали, пропуская через них углекислый газ. МЖК наносили на форму вручную двумя-тремя слоями с последующей просушкой.

Уровень износостойкости определяли на машине трения в условиях статической нагрузки 50 кгс в условиях скольжения с частотой вращения 428 об/мин. Абразивная среда создавалась кварцевым песком, который подавался в зону трения. В образцах методом измерения твердости и микротвердости исследования показали наличие модифицированного слоя с глубиной до 1,5 - 2 мм и твердостью до 1300 МПа. Результаты измерений микротвердости модифицированного слоя приведены в таблице 1. Кроме того, результаты экспериментов близко согласуются с

зависимостями рисунок 3 и рисунок 6. После выбивки отливок они имели матово-серый оттенок. Поверхность не имела несплошностей в отличие от литья в земляные формы (см. Рисунок 7). Всего было испытано 5 образцов.

Таким образом, разработанная технология борирования позволяет увеличить износостойкость рабочих поверхностей колес, а, следовательно, и их ресурс, более чем в два раза.



Рисунок 7 - Вид борированной отливки



Рисунок 8 – Структурные неоднородности поверхностного слоя

Необходимо отметить, что при модифицировании происходит не только упрочнение поверхностного слоя, но модифицированный слой служит еще и антипригарным покрытием, улучшая качество поверхности отливки. Таким образом, предложенная технология позволяет улучшить качество отливок за счет поверхностного упрочнения и улучшения качества поверхности. Кроме того, использование термоциклической обработки и ХТО в одном технологическом процессе исправляет крупнозернистость и другие дефекты структуры, получаемые обычно при высокотемпературной ХТО (см. Рисунок 8), и позволяет достичь заметного повышения износостойкости, причем меньшая твердость слоев компенсируется их более высокой пластичностью, а, следовательно, большей устойчивостью к ударным нагрузкам.

Проведенные исследования позволили установить материал, который целесообразен для литья рабочих колес насосов - легированный чугун с

поверхностным упрочнением бором. Износостойкость рабочих колес после борирования оценивалась по формуле расчета массового износа (см. формулу 1). Сравнения результатов до и после процесса борирования представлены ниже (см. Рисунок 9).

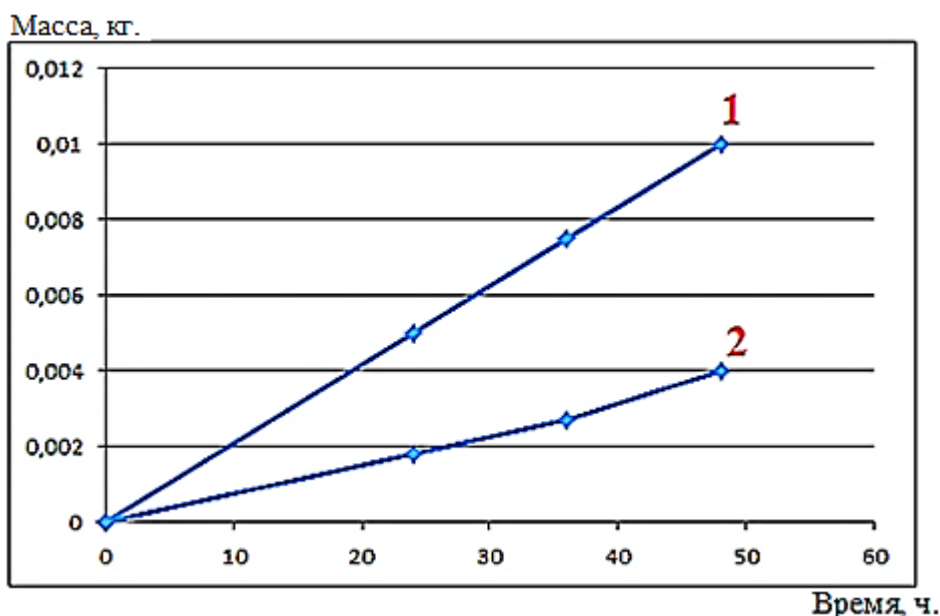


Рисунок 9 - Массовый износ рабочих колес: 1- до процесса борирования, 2- после процесса борирования

При проведении модифицирования происходит не только упрочнение поверхностного слоя, но модифицированный слой служит антипригарным покрытием, улучшая качество поверхности отливки.

Используемая технология позволяет улучшить качество отливок за счет поверхностного упрочнения и улучшения качества поверхности рабочих колес.

В третьей главе рассматривается метод и технология объемного упрочнения материалов и рабочих колес погружных центробежных насосов методом магнитно-импульсной обработки (МИО).

Метод борирования позволил уменьшить износ поверхности, но для создания сопротивления усталости и пиковым нагрузкам необходимо провести объемное упрочнение без изменения свойств поверхности.

Этому требованию удовлетворяет метод магнитно-импульсной обработки (МИО). При проникновении плоской электромагнитной волны в металл, уменьшается

амплитуда напряженности электрического и магнитного полей и меняются фазы колебаний. В результате вещество изменяет свои физические и механические свойства. Улучшение свойств деталей достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличивается тепло- и электропроводимость материала и как, следствие, в материале возникают сжимающие напряжения первого и второго рода, причем они присутствуют не только на поверхности, но и в сердцевине. Взаимодействие импульсного магнитного поля с деталью из токопроводящего материала происходит тем интенсивнее, чем выше структурная и энергетическая неоднородность вещества. Поэтому, чем выше концентрация поверхностных и внутренних напряжений в заготовках, тем больше вероятность локальной концентрации в них микро-вихрей внешнего поля, и тем длительнее течение релаксационных процессов в веществе.

При изготовлении деталей в материале неравномерно концентрируется некоторое количество избыточной энергии, с увеличением которой возрастает вероятность разрушения детали. Применяя метод магнитно-импульсной обработки (МИО), можно значительно уменьшить избыточную энергию материала, связанную с концентрацией внутренних и поверхностных напряжений в детали, и снизить до минимума вероятность ее разрушения.

Обработка проводилась импульсным магнитным полем, напряженностью 100 кА/м, тремя импульсами и при длительности импульса 3 секунды, напряженность поля уменьшалась с последующим импульсом. За счет МИО теплопроводность повышается не менее, чем на 10%, а временное сопротивление на изгиб на 15-20%, что обуславливает снижение выкрашивания зерен из кромки.

Расчет возникающих напряжений выполнен с использованием рентгеновского фазового анализа. Рентгенограммы снимались на α - Fe излучении с использованием аппарата «ДРОН» и определялись сжимающие напряжения первого и второго рода.

В результате такой обработки наблюдалось увеличение дисперсности структуры

(измельчение) поверхностного слоя и плотности дислокаций (см. Рисунок 10).

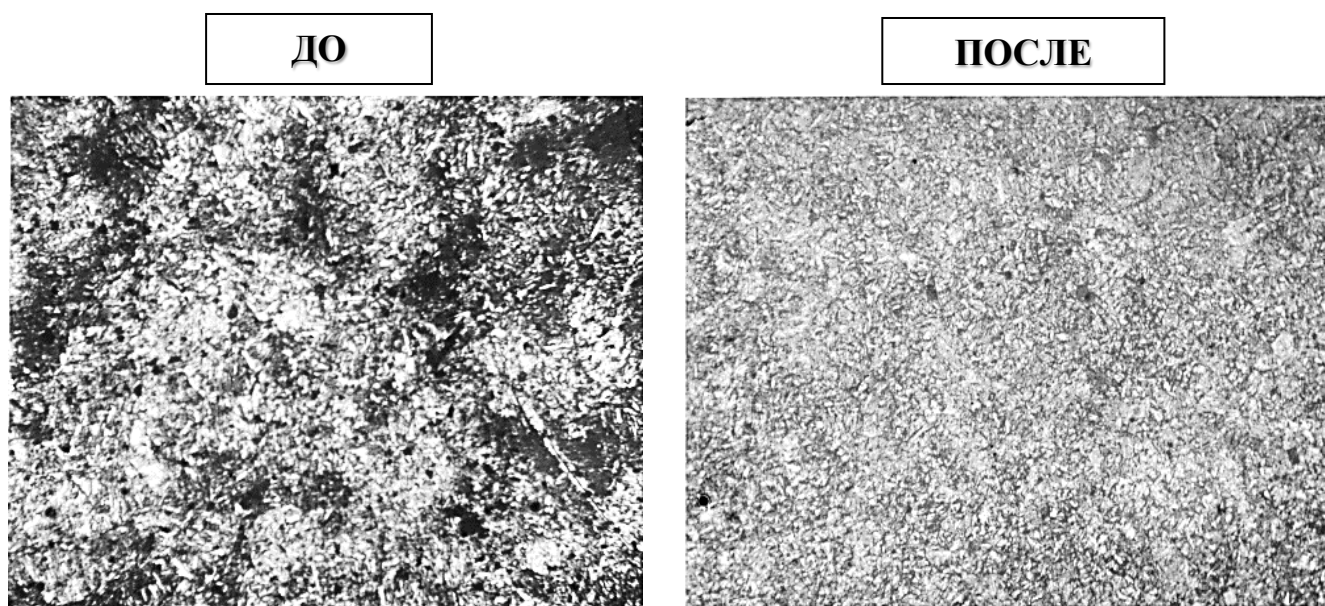


Рисунок 10 - Структура поверхности рабочего колеса до и после магнитно-импульсной обработки

Расчет напряжений проводился на основе изменения межплоскостных расстояний и отношений $\Delta d/d$ с неупрочненного и упрочненного образца. При этом соблюдались следующие условия:

- выбранные отражающие плоскости были под углом 75° - 350° ,
- линии рентгенограммы были острыми и четкими, для чего использовалась съёмка с малыми диафрагмами и хорошо подготовленная поверхность,
- ошибка в нахождении $d = \pm 0,0001$ к X может привести при съёмке образцов к ошибке в определении $1 \sigma + 2 = 1,7$ кг/мм².

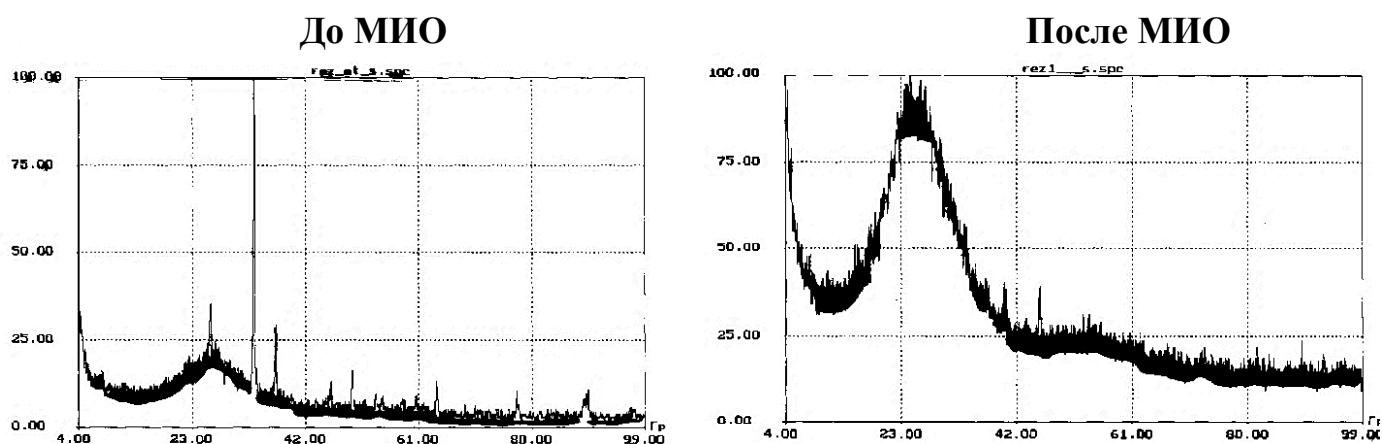


Рисунок 11 - Рентгенограммы образцов в исходном состоянии и после борирования

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что переманчивание полем высокой напряженности способствует увеличению твердости, повышению прочности и как следствие, ресурса рабочих колес.

В результате исследований установлено, что под действием импульсного магнитного поля возникает ударная волна, которая, распространяясь вглубь образца, вызывает упрочнение внутренних слоев, что повышает усталостную прочность.

Таким образом, показаны основные параметры магнитно-импульсной обработки, что позволило достичь существенного прогресса в объемном упрочнении рабочих колес.

Таблица 2

Сводные данные по объемному упрочнению рабочих колес по методу МИО

Угол отражения	Изменение напряжений, МПа					
	1рода			2рода		
	Пов	-0,1min	Центр	Пов	-0,1min	Центр
56	-25,71	-66,34	-41,13	-91,8	-238,7	-146,3
28	-83,07	-97,9	-99,33	-295,57	-349,65	-231,9

Основным показателем является поверхностная твердость и сжимающие напряжения определяющие ресурс работы насоса. Технологический процесс борирования при литье обеспечивает получение твердого борированного слоя на глубину до 2 мм и твердость до 1300 МПа.

В диссертационной работе приведено технико-экономическое обоснование, где проведенные испытания показали увеличение ресурса рабочего колеса на 150 – 200%.

Себестоимость базового рабочего колеса составила: **530 руб. за штуку**

Себестоимость рабочего колеса после борирования и МИО составила: **600 руб.** за одну единицу изделия.

Таким образом, при удорожании детали на 10%, удалось увеличить ее ресурс в два и более раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований в диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи, состоящей в выборе и обосновании методов повышения ресурса скважинных погружных центробежных насосов, что

позволит увеличить эффективность процесса отбора жидкости из горных выработок. Разработанные методы позволяют повысить ресурс насосов за счет увеличения износостойкости рабочих поверхностей борированием и усталостной прочности магнитно-импульсной обработкой.

Основные результаты исследований и выводы, полученные лично автором:

1. Установлено, что основным видом износа при эксплуатации погружных центробежных насосов является гидроабразивный износ и усталостное разрушение рабочих колес. В этих условиях наилучшим материалом, из которого необходимо изготавливать рабочие колеса насосов, является легированный литейный чугун с поверхностным упрочнением бором.

2. Выявлена зависимость ресурса насоса от износостойкости поверхностей рабочего колеса. Обоснован и разработан метод увеличения ресурса рабочего колеса за счет повышения износостойкости рабочих поверхностей борированием.

3. Установлено, что повышение ресурса рабочего колеса насоса не менее чем в два раза достигается при твердости борированного поверхностного слоя HV более 1000 МПа и глубине упрочняющего слоя 1,5 - 2,0 мм.

4. Обоснован и разработан метод повышения усталостной прочности рабочего колеса насоса магнитно-импульсной обработкой.

5. Установлено, что повышение усталостной прочности рабочего колеса, не менее чем в два раза, достигается при создании остаточных сжимающих напряжений первого и второго рода.

6. Определены параметры химико-термической и магнитно-импульсной обработки рабочего колеса насоса, позволяющие увеличить его ресурс до двух раз, а также обеспечить равно-изнашиваемость основных деталей насоса.

7. Создана технология повышения износостойкости литых деталей насоса и увеличения их усталостной прочности и на этой основе разработан технический регламент по повышению ресурса насоса.

8. Результаты научных исследований внедрены на производстве в ОАО НПО «Гидромаш» и ООО «Завод «Спецмонтажконструкция» при изготовлении насосов

и используются в учебном процессе в "МИСиС" при подготовке студентов по специальности 151001 – «Технология машиностроения» и 150402 – «Горные машины и оборудование».

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Акопов Е.Ю. Выбор метода повышения долговечности рабочих колес погружного центробежного насоса / Технология повышения долговечности рабочего колеса погружного центробежного насоса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №4. Отдельные статьи (специальный выпуск) С. 3-8
2. Акопов Е.Ю. Технология повышения долговечности рабочего колеса погружного центробежного насоса изготовленного литьем / Технология повышения долговечности рабочего колеса погружного центробежного насоса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №4. Отдельные статьи (специальный выпуск) С. 9-13.
3. Акопов Е.Ю. Анализ методов поверхностного упрочнения для рабочих колес центробежного насоса / Технология повышения долговечности рабочего колеса погружного центробежного насоса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – №4. Отдельные статьи (специальный выпуск) С. 14-19

Подписано в печать 16.02.2017 г.

Объем 1,5 п.л.

Тираж 100 экз.

Формат 60х90/16

Заказ