

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

На правах рукописи

АКОПОВ ЕНОК ЮРЬЕВИЧ



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

**Специальность 05.05.06 – «Горные машины»**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

Доцент, кандидат технических наук

Шахова Кира Ивановна

Москва 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                        |          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>                                                                                                                                                   | <b>5</b> |
| <b>ГЛАВА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ. ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ ВОЗМОЖНОГО УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АГРЕГАТОВ.</b> |          |
| 1.1. Исследование технических и эксплуатационных параметров погружных электронасосных агрегатов.....                                                                   | 7        |
| 1.1.2. Скважинные центробежные насосы.....                                                                                                                             | 13       |
| 1.1.3. Технические характеристики насосов .....                                                                                                                        | 21       |
| 1.2. Изучение возможности увеличения долговечности агрегатов на основе анализа уровней износа деталей и узлов агрегатов .....                                          | 26       |
| 1.2.1. Анализ работы электрических центробежных насосов и их основных частей.....                                                                                      | 26       |
| 1.2.2. Анализ работы погружных центробежных насосов с рабочими колесами из чугуна, полиамида и нерезиста .....                                                         | 29       |
| 1.3. Изучение возможности повышения характеристик погружных насосов .....                                                                                              | 33       |
| 1.4. Поверхность, трение и износ - общие представления .....                                                                                                           | 37       |
| 1.4.1. Скважинная жидкость как гетерогенная многокомпонентная система .....                                                                                            | 38       |
| 1.4.2. Трение .....                                                                                                                                                    | 39       |
| 1.4.3. Износ .....                                                                                                                                                     | 39       |
| 1.4.4 Коррозия .....                                                                                                                                                   | 42       |
| 1.4.5. Долговечность и надежность оборудования .....                                                                                                                   | 46       |
| 1.4.6. Экономические потери от трения и износа .....                                                                                                                   | 49       |
| Вывод по главе 1 .....                                                                                                                                                 | 50       |
| <b>ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ РАБОЧИХ КОЛЕС ЭЛЕКТРОНАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ</b>      |          |
| 2.1. Исследование технологии получения, структуры и свойств литейного чугуна – материала рабочих колес .....                                                           | 52       |

|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1.1. Состав чугуна, технология изготовления рабочего колеса и возможности ее совершенствования .....                          | 53  |
| 2.1.2 Исследование взаимосвязи структуры и свойств чугуна .....                                                                 | 56  |
| 2.2. Изучение механизмов износа деталей в условиях, близких к режимам эксплуатации рабочих колес .....                          | 62  |
| 2.2.1. Изучение износостойкости хромомарганцевых чугунов .....                                                                  | 62  |
| 2.2.2.Изучение износостойкости рабочих колес с повышенными характеристиками.....                                                | 66  |
| 2.2.3. Модифицирование поверхности рабочих колес как способ управления служебными свойствами.....                               | 67  |
| 2.3. Анализ методов поверхностного упрочнения материалов с целью выбора оптимального решения для рабочих колес .....            | 69  |
| 2.4. Отработка технологии поверхностного упрочнения рабочих колес .....                                                         | 78  |
| 2.4.1. Борирование по методу химико-термической обработки (ХТО) .....                                                           | 78  |
| 2.4.2. Изнашивание в гидроабразивном воздействии .....                                                                          | 84  |
| 2.4.3. Изнашиваемые поверхности из металлических материалов .....                                                               | 85  |
| 2.4.4. Изнашиваемые поверхности из абразивных материалов .....                                                                  | 87  |
| 2.4.5. Изнашивание в газообразном и гидроабразивном потоках .....                                                               | 90  |
| 2.4.6. Энергетика процесса абразивного изнашивания .....                                                                        | 97  |
| 2.4.7. Изнашиваемые поверхности .....                                                                                           | 101 |
| 2.4.8. Отработка энергосберегающей технологии модернизации поверхности рабочих колес .....                                      | 103 |
| 2.4.9. Некоторые предпосылки анализа процессов структуро- и фазообразования при модифицировании поверхности рабочих колес ..... | 115 |
| 2.5. Выводы по главе 2 .....                                                                                                    | 117 |

### **ГЛАВА 3. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБЪЕМНОГО УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ОБЪЕМНОГО УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ КОЛЕС ПО МЕТОДУ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ**

|                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.1. Актуальность применения методов комплексного упрочнения деталей –<br>обработки поверхности и объема для рабочих колес ..... | 118        |
| 3.2. Анализ методов объемного упрочнения материалов с целью выбора<br>оптимального решения для рабочих колес .....               | 120        |
| 3.2.1. Метод упрочняющей термоциклической обработки .....                                                                        | 120        |
| 3.2.2. Метод объемно-поверхностной закалки литых деталей .....                                                                   | 122        |
| 3.2.3. Группа методов электромагнитного воздействия .....                                                                        | 126        |
| 3.2.3.1. Лазерные методы упрочнения .....                                                                                        | 126        |
| 3.3. Метод магнитно-импульсного упрочнения – технология и аппаратура .....                                                       | 128        |
| 3.4. Отработка технологии объемного упрочнения рабочих колес по методу<br>магнитно-импульсной обработки .....                    | 137        |
| 3.4.1. Разработка аппаратного оформления и основных параметров магнитно-<br>импульсной обработки .....                           | 137        |
| 3.5. Выводы по главе 3 .....                                                                                                     | 147        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>                                                                                                          | <b>148</b> |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>                                                                                                   | <b>149</b> |
| <b>ПРИЛОЖЕНИЕ А – ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ....</b>                                                                     | <b>160</b> |

## **ВВЕДЕНИЕ**

**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 электрические центробежные насосы типа ЭЦВ и ЭЦН наиболее экономичны и менее трудоемки при их обслуживании в сравнении с компрессорными насосами других типов.

Однако, в настоящее время ресурс отечественных насосов существенно ниже, чем у зарубежных аналогов. 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 насосов является актуальной научной задачей.

**Целью работы** является установление зависимостей ресурса 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 насосов путем увеличения износостойкости рабочего колеса борированием поверхностных слоев и его усталостной прочности магнитно-импульсной обработкой за счет создания остаточных сжимающих напряжений.

### **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

#### **Научные положения, выносимые на защиту, и их новизна:**

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

2. Метод 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 насоса, отличаются тем, что они обеспечивают повышение ресурса не менее чем в два раза.

**Обоснованность и достоверность результатов исследований** подтверждается представительным 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 зависимости ресурса насоса от износостойкости поверхностей рабочего колеса, в разработке методов повышения износостойкости поверхностей и усталостной прочности, а так же 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 технического регламента по повышению ресурса насоса.

**Реализация результатов работы.** Технология повышения износостойкости рабочих поверхностей колеса насоса борированием и усталостной прочностью магнитно-импульсной обработкой и технический регламент по повышению ресурса насоса приняты к использованию в ОАО НПО «Гидромаш» и ООО «Завод «Спецмонтажконструкция».

Результаты исследований используются в учебном процессе Национального исследовательского технологического университета «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 РФ.

**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.

## **ГЛАВА 1**

**Исследование технических и эксплуатационных параметров погружных насосов. Изучение методов возможного увеличения долговечности агрегатов.**

**1.1. Исследование технических и эксплуатационных параметров погружных электронасосных агрегатов**

В нефтедобывающей промышленности и при разработке месторождений полезных ископаемых подземным и открытым способами широко используются динамические лопастные насосы[1-3]. Они получили широкое распространение среди насосных агрегатов с рабочими колесами центробежного типа, так как они создают достаточно большой напор при любых заданных подачах жидкости и габаритах насоса, но обладают при этом большим КПД и надежностью.

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

Скважинный электро-центробежный насосный агрегат приводится в действие погружным электродвигателем. Подача электроэнергии к двигателю осуществляется по специальному кабелю, который располагается непосредственно в скважине вместе с насосно-компрессорными трубами (НКТ). Такая компоновка привода вблизи насоса позволила решить задачу передачи электроэнергии от привода, непосредственно к скважинному электроцентробежному насосу, а также использовать насосы большой мощности. Обширное использование скважинных электроцентробежных насосов (ЭЦН) связано с многими факторами. При больших отборах жидкости из горной скважины, установки ЭЦН обладают большей экономичностью и наименее трудоемки при техническом обслуживании в сравнении с добычей при использовании компрессора и подъемом жидкости насосами других типов. При существенных подачах, затраты на электроэнергию и на установку, относительно невелики, табл.1[3].



Табл.1 Основные параметры погружных центробежных насосов обычного исполнения

| Тип насоса             | Подача,<br>м <sup>3</sup> /сутки | Напор,<br>М | Число<br>ступеней | потребляемая<br>мощность,<br>кВт |
|------------------------|----------------------------------|-------------|-------------------|----------------------------------|
| ЭЦН -5-20-750          | 20                               | 775         | 207               | 6                                |
| ЭЦН -5-20-1000         | 20                               | 1070        | 289               | 8.6                              |
| ЭЦН -5-20-1300         | 20                               | 1300        | 353               | 10.8                             |
| ЭЦН -5-40-700          | 40                               | 780         | 207               | 10.1                             |
| ЭЦН -5-40- 950         | 40                               | 950         | 226               | 12                               |
| ЭЦН -5-40-1400         | 40                               | 1520        | 412               | 19                               |
| ЭЦН -5-80-800          | 80                               | 780         | 206               | 16.4                             |
| ЭЦН -5-80-1300         | 80                               | 1350        | 351               | 28                               |
| ЭЦН -5-130-600         | 130                              | 670         | 167               | 18.9                             |
| ЭЦН -5-200-650         | 130                              | 1135        | 234               | 32                               |
| ЭЦН -5-200-800         | 200                              | 690         | 186               | 32.5                             |
| ЭЦН -5-100-900         | 200                              | 850         | 227               | 40                               |
| <b>ЭЦН -6-100-1500</b> | <b>100</b>                       | <b>860</b>  | <b>171</b>        | <b>18.5</b>                      |
| ЭЦН -6-160-750         | 100                              | 1450        | 212               | 32.2                             |
| ЭЦН -6-160-1100        | 160                              | 780         | 121               | 27                               |
| ЭЦН -6-160-1450        | 160                              | 1090        | 171               | 38.2                             |
| ЭЦН -6-250-800         | 160                              | 1515        | 238               | 51.9                             |
| ЭЦН -6-250-1050        | 250                              | 875         | 151               | 43                               |
| ЭЦН -6-250-1400        | 250                              | 1230        | 212               | 61                               |

КПД погружных установок достаточно высок (до 0,35). Техническое обслуживание насосных установок не вызывает сложностей, поскольку на поверхности располагается только пульт управления и трансформатор, которые не требуют постоянного ухода. Установки легко поддаются автоматизации и модернизации. Состав узлов установки ЭЦН и их расположение приведены на рис. 1.

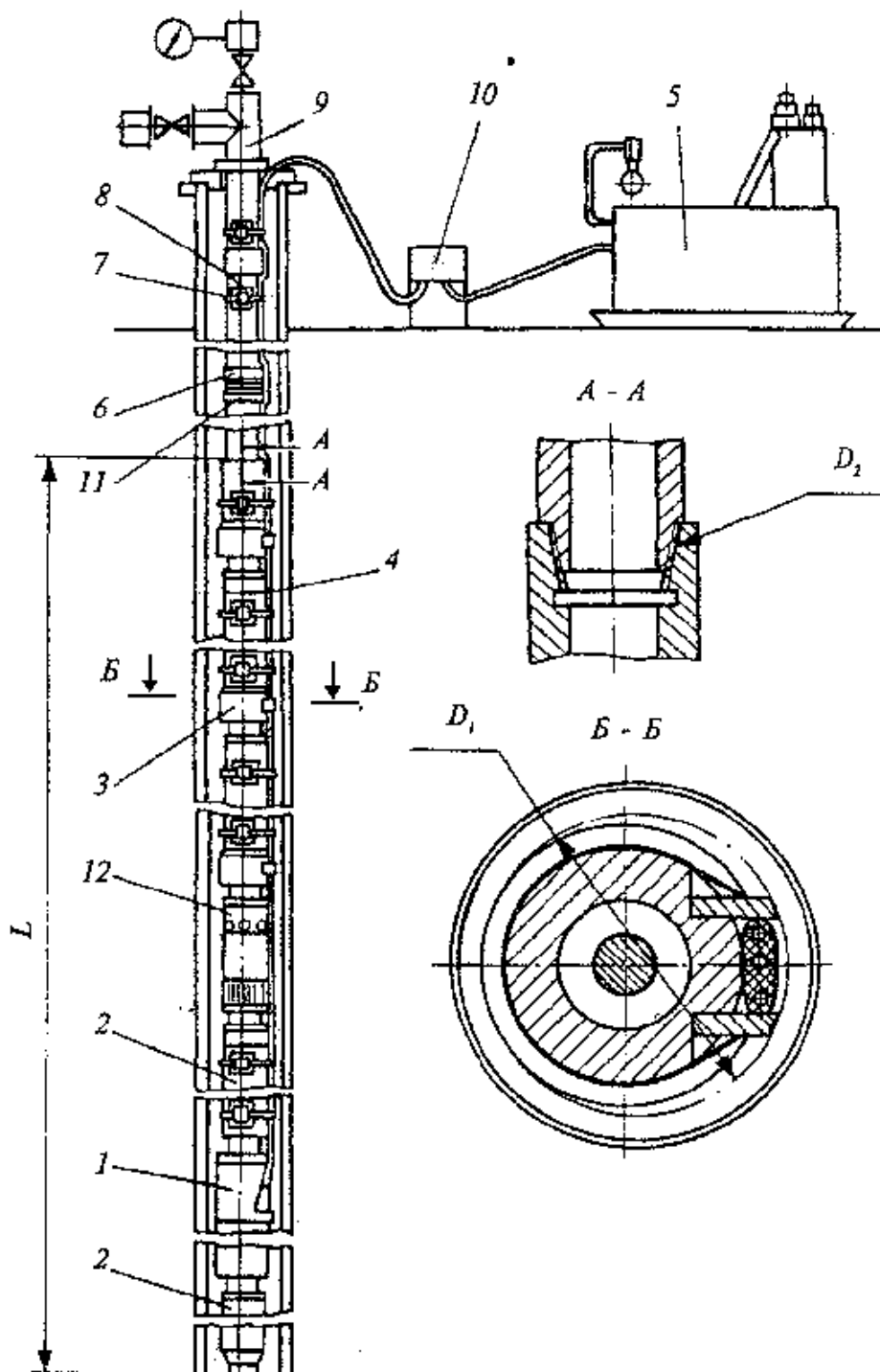


Рис.1 Монтажная схема электроприводного центробежного насоса

1- двигатель; 2-кожух (гидрозащита); 3 - насос; 4- кабели; 5- трансформатор; 6- клапан спускной; 7- хомут (пояс); 8- труба насосно-компрессорная; 9- оборудование; 10- место подключения; 11- обратный клапан; 12- газосепаратор; L, D- длина и диаметр насосного агрегата; D- диаметр резьбы НКТ.

Из рассмотрения приведенной схемы можно сделать вывод, что отказ одного из элементов приводит к остановке насоса, поэтому надо стремиться к

равноресурсному значению параметров или соблюдать кратность, соответствующую ремонтным срокам.

Скважинные насосы являются многоступенчатыми, от 80 до 500 и более ступеней. Отказ одной ступени приводит к остановке насоса или снижению его производительности.

Такое исполнение насоса принято в связи с малыми значениями напора каждой ступени, которые составляют от 3,5 до 7 м водяного столба. Эти величины напора обусловлены малыми размерами рабочего колеса, которое необходимо разместить в "обсадной колонне" скважины. Ступени насоса работают последовательно, т.е. в насосе суммируется напор всех ступеней, подача же насоса равна подаче одной ступени.

Возможны несколько вариантов модификации насоса, двигателя и подводящего кабеля, в том числе определяющих размеры агрегата (рис. 2). В первом случае (рис. 2, а) габариты агрегата  $A_{max} = D_{\text{насоса}}$ , а диаметр насоса  $D_H$  и высота плоского кабеля  $h_K$  включены в габариты двигателя. В этом случае мы получаем большую мощность с высоким КПД электродвигателя, но при этом максимальная подача будет уменьшена, так как подача центробежного насоса зависит от диаметра рабочего колеса в кубе ( $D$ ).

При третьем варианте (рис. 2, в)  $D_H = D_a$ , а размеры определяются суммой размеров двигателя (или насоса), кабеля и защитных приспособлений. При таком варианте, подача центробежного насоса расположения узлов агрегата будет максимальной, но мощность электродвигателя при этом уменьшится. На практике в основном используют промежуточный вариант (рис. 2, б).

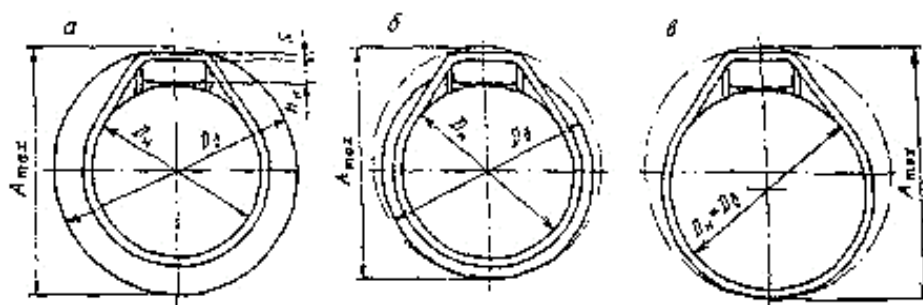


Рис.2 Схема компоновки ЭЦН.

Применяемые в России насосные установки проектированы для скважин с обсадными колоннами с различным диаметром 127, 140, 146 и 168 мм. Для обсадных колонн диаметрами 146 и 168 мм имеются погружные агрегаты двух габаритов. Один из них используется в скважинах с наименьшим внутренним диаметром (по ГОСТу) обсадной колонны, при этом агрегат ЭЦН имеет меньший диаметр, и как следствие меньшие предельные величины рабочей характеристики (напор, подача, кпд). Другие габаритные установки предназначены для скважин с большими внутренними диаметрами. Здесь агрегаты и их параметры могут быть большими (табл. 2).

Таблица 2. Некоторые параметры погружных агрегатов ЭНЦ

| Диаметр обсадной колонны, мм |                       | Данные агрегата |                           |                                     |
|------------------------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------------|
| номинальный                  | наименьший внутренний | Габариты, мм    | Наибольшая подача, м³/сут | Номинальная мощность двигателя, кВт |
| 127/140                      | 112                   | 96              | 200 (250)                 | 63 (90)                             |
| 146                          | 122                   | 113             | 200 (350)                 | 90 (125)                            |
| 146                          | 130                   | 117             | 500 (700)                 | 125 (180)                           |
| 168                          | 144                   | 123             | 1250 (1500)               | 250 (500)                           |
| 168                          | 148                   | 130             | 1500 (2000)               | 360 (750)                           |

В таблице в скобках показана перспектива увеличения параметров установок.

Погружные центробежные насосы, газосепараторы и погружные двигатели для УЭЦН производятся в России в соответствии с техническими условиями, разработанными заводами-изготовителями.

Длина сборки насоса, газосепаратора и двигателя с гидрозащитой может достигать 25 м и более. Частота вращения вала является оптимальной при условии работы без каких-либо преобразователей. Частота вращения при частоте тока 50 Гц синхронная —  $3000 \text{ мин}^{-1}$ , а с учетом скольжения  $2800 - 2950 \text{ мин}^{-1}$ . Для увеличения подачи и напора рабочей ступени центробежного насоса за счет увеличения частоты вращения ротора насоса, применяются специальные исполнения погружных двигателей (например, вентильные) или преобразователи частоты питающего электродвигатель электрического тока (ЧПТ).

Конструктив насосов и двигателей, эксплуатации их в агрессивной среде, при высоких температурах, работа в течение многих месяцев без профилактики и ремонтов, поставили перед конструкторами и технологами множество сложных задач, где требуется повышенная надежность и долговечность. При этом были созданы эффективные, высоконапорные ступени насоса (рабочие колеса) с диаметром колеса от 50 до 80 мм, решены технологические приемы производства валов длиной до 7 м и диаметром от 17 до 26 мм, изготовления корпусов длиной до 6,5 м и с внутренним диаметром от 70 до 100 мм. Опыт отечественного и мирового насосостроения, уровень модернизации технологических процессов в насосостроении привели к прогрессу в осуществлении данных задач. Вместе с тем, задачи дальнейшего совершенствования эффективной работы насосов ставят перед специалистами вопросы создания агрегатов с повышенными показателями долговечности, надежности.

Рассмотрим подробно основные элементы центробежных насосов, их расчет, возможность модернизации и перспективы расширения их применения.

### **1.1.2. Скважинные центробежные насосы**

Скважинные центробежные насосы представляют собой многоступенчатые машины. Это связано в основном с не большими показателями напора,

создающиея одной ступенью (рабочим колесом и направляющим аппаратом). Небольшие значения напора одной ступени (от 3 до 7 м водяного столба), в свою очередь определяются не большими значениями наружного диаметра колеса, ограниченного внутренним диаметром обсадной колонны и размерами применяемого скважинного оборудования — кабеля, погружного двигателя и т.д.

Конструкция центробежного насоса может быть обычной и обеспечивать износостойкость и коррозионную стойкость. Диаметры и состав узлов насоса в основном одинаковы для всех исполнений насоса.

Рабочие колеса и направляющие аппараты насосов обычного исполнения изготавливают из модифицированного серого чугуна, насосов коррозионностойких — чугуна типа «ниррезист», износостойких колес — их полиамидных смол.

Погружной электро-центробежный насос в стандартном исполнении предназначен для забора жидкости из скважины с содержанием воды до 99%. Количество примесей в жидкости должно быть не более 0,01 массовых % (или 0,1 г/л), а твердость примесей не более 5 единиц по шкале Мооса, сероводорода — не более 0,001%. По техническим параметрам заводов-производителей, содержание газа в местах приема, не должно превышать 25%.

Электро-центробежный насос в коррозионно устойчивом исполнении предназначен для отбора пластовой жидкости при содержании в ней сероводорода не более 0,125% (до 1,25 г/л).

Износостойкое исполнение погружного насоса позволяет откачивать пластовую жидкость с содержанием частиц (примесей) не более 0,5 г/л.

Основным элементом погружного электро-центробежного агрегата является ступень насосная (СН) с цилиндрическими (ЦЛ) или наклонно-цилиндрическими лопастями (НЦЛ), состоящая из аппарата направляющего и рабочего колеса (рис. 3).

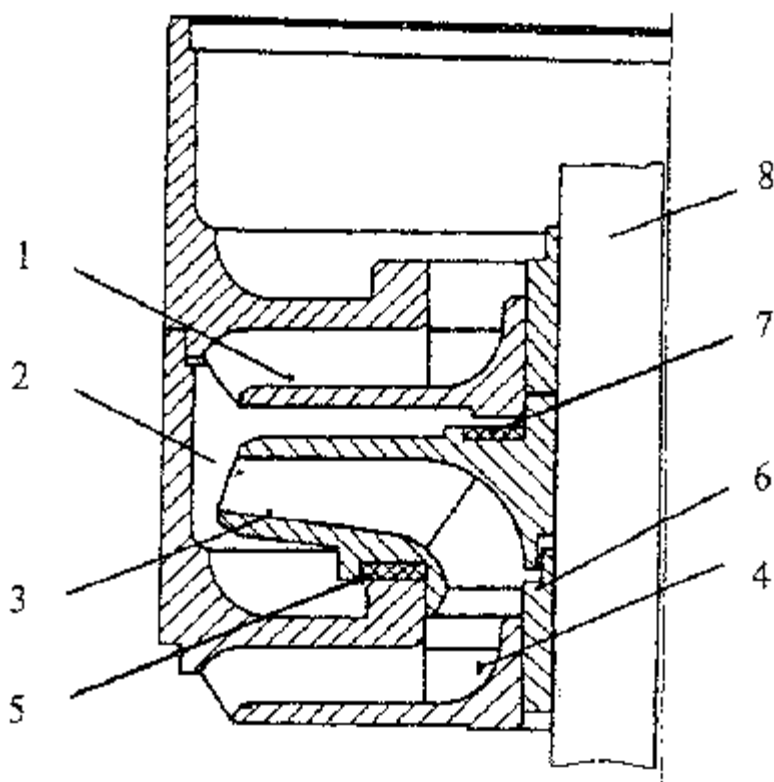


Рис. 3 Ступень электро-центробежного насоса.

Насосы с цилиндрическими лопастями используются при номинальных подачах до 125 м<sup>3</sup>/сут., в насосах с диаметром 103 мм и до 250 м<sup>3</sup>/сут, в насосах с наружным диаметром 86 и 92 мм, до 160 м<sup>3</sup>/сут.

1-аппарат направляющий; 2-рабочее колесо; 4-камеры кольцевые (безлопаточные); 5- опорная шайба (нижняя); 6- втулка; 7- шайба (верхняя); 8- вал.

Ступени устанавливаются в расточке каждой секции цилиндрического корпуса. В секции, в зависимости от их монтажной высоты, может размещаться от 39 до 200 ступеней.

Ступени с наклонно-цилиндрическими лопастями используются в насосах с большой подачей. В области своего применения данные ступени обладают более чем в 1,5 раза увеличенную подачу высокий КПД, чем ступени с цилиндрические в тех же габаритах по диаметру. Диаметр ступеней составляет 70, 80, 90 и 100 мм.

Для сборки электро-центробежного насоса с большим количеством ступеней и разгрузки вала от осевой силы, применяется рабочее колесо плавающего типа. Направляющий аппарат и колесо в насосе, не фиксируется на валу и от проворота,

фиксируется призматической шпонкой. В промежутке, ограниченном опорными поверхностями аппаратов направляющих, рабочие колеса могут перемещаться в осевом направлении.

Рабочее колесо опирается на осевую опору, индивидуальную для каждой ступени насоса, которая состоит из опорного бурта направляющего аппарата предыдущей ступени и антифрикционной шайбы, которая запрессована в расточку колеса. Это может быть связано с применяемой конструкцией или с технологией, а также с тем, какой материал используется для изготовления колеса.

Из-за потерь трения в нижней опоре колеса, снижается механический КПД ступени с плавающим рабочим колесом. При первом приближении видно, что величина данных потерь пропорциональна осевой силе, которая действует на рабочее колесо ступени.

На рисунке 4, представлена относительная характеристика ступени насоса. Под величиной относительной понимается отношение величины фактической к соответствующей, на оптимальном режиме, при котором достигается максимальное значение КПД[1].

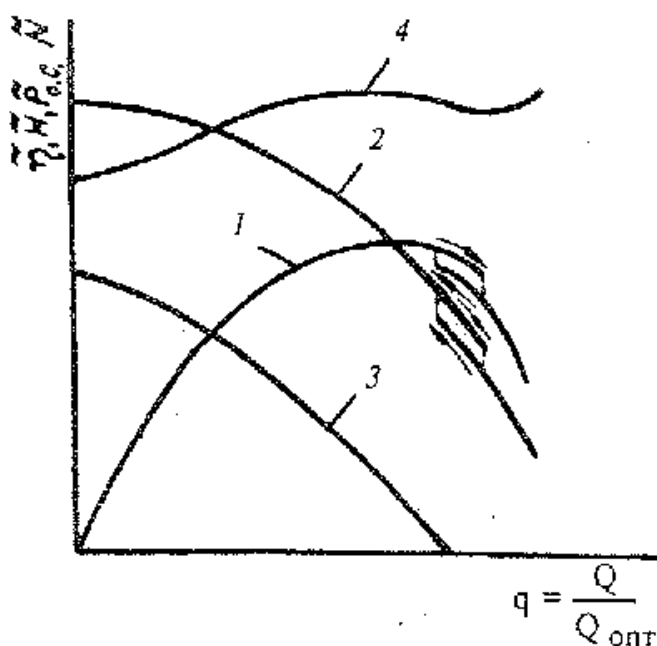


Рис. 4. Схема относительной характеристики ступени:



1- относительный КПД ( $h$ ); 2- относительный напор ( $H$ ); 3- относительная сила ( $P_{oc}$ ); 4- мощность относительная ( $N$ );  $q$ -подача относительная;  $Q$  – фактическая подача;  $Q^0$ - подача, соответствующая максимальному КПД (оптимальная).

Как видно из приведенных данных, изменение КПД имеет максимум, который соответствует наиболее эффективному режиму работы ступени.

Рабочее колесо ступени насоса (СН) может «всплыть» при режимах работы, примерно на 10% превышающих подачу нулевой осевой силы. Всплытие колеса сопровождается снижением напора (в виде скачков), КПД и при увеличении подачи, резким повышением потребляемой мощности. Колесо может переместиться вверх к осевой опоре, состоящей из опорного бурта на направляющем аппарате и шайбы, которая запрессована в расточку рабочего колеса, также рабочее колесо может опускаться в нижнее положение при значениях относительной подачи  $q = 0,9-1,0$ , в случае уменьшения подачи от режима открытой задвижки.

В настоящее время часто применяют, для разгрузки колеса от осевой силы в ступенях с НЦЛ, второе верхнее уплотнение камеры за ведущим диском колеса, в котором давление на входе в колесо выравнивается, благодаря отверстиям в ведущем диске (рис. 5, а). Разгруженное колесо позволяет значительно уменьшить осевую силу. По сравнению с аналогичными ступенями с неразгруженными рабочими колесами имеется ряд преимуществ: увеличенный ресурс работы нижней опоры рабочего колеса, увеличенный показатель КПД ступеней.

Имеются недостатки ступеней с разгруженными рабочими колесами, где затруднена технология и повышение трудоемкости изготовления, функциональный отказ способа разгрузки при засорении разгрузочных отверстий и при износе верхнего уплотнения рабочего колеса. В таком случае износостойкость работы зависит от выбора конструктивного исполнения.

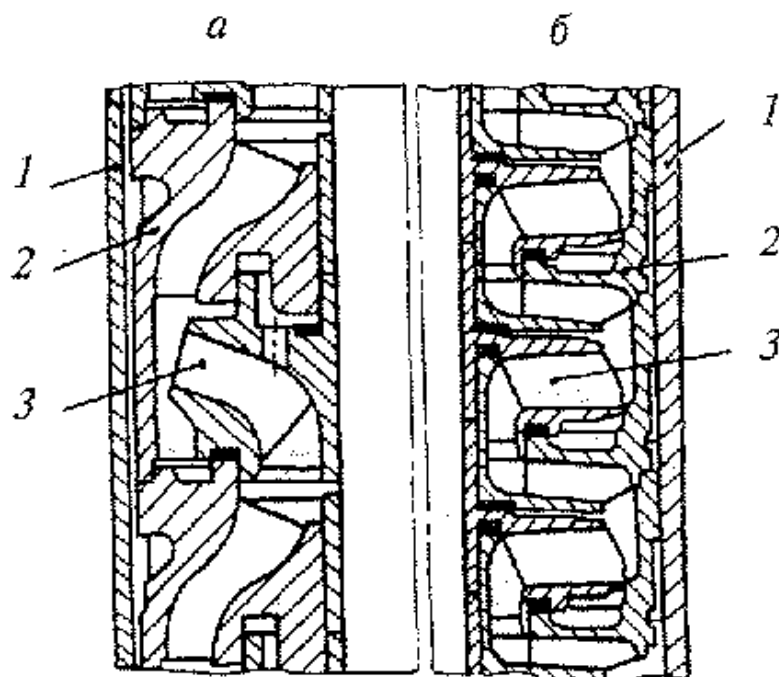


Рис. 5 Конструкция ступеней

Модификация а.- с разгруженным рабочим колесом; Модификация б.- двухопорная конструкция;

1- корпус насоса; 2-аппарат направляющий; 3- рабочее колесо.

При применении конструкции двухопорного типа, может быть достигнуто усиление пары осевой опоры и уплотнения между ступенями (рис. 5, б). Конструкция двухопорная, имеет по сравнению с одноопорной ступенью, повышенный ресурс нижней пяты ступени, более надежную изоляцию от абразивной и агрессивной жидкости вала, увеличенный ресурс работы и большую жесткость вала насоса из-за увеличенных осевых длин межступенных уплотнений, служащих в ЭЦН помимо уплотнения дополнительными радиальными подшипниками.

Двухопорная конструкция ступени, более трудоемка в производстве в сравнении с одноопорной.

Рабочее колесо при эксплуатации в сравнении с другими конструктивными элементами насоса испытывает максимальный уровень нагрузок, связанных с одновременным воздействием на него сил, возникающих при вращении и сопутствующих колебаниях, а также при взаимодействии со скважинной

жидкостью, природа которого, имеет сложный и многофакторный характер. Основной износ за счет различных факторов приходится на рабочие колеса.

Рабочее колесо:

- является главной частью центробежного насоса;
- обеспечивает бесперебойную подачу жидкости;
- в большинстве случаев колеса определяют срок службы насоса.

Таким образом, рабочее колесо представляет собой наиболее уязвимый элемент в конструкции насоса, лимитирующий основные эксплуатационные параметры насоса – срок службы, надежность и др.

Эти обстоятельства предопределили выбор предмета исследований настоящей работы – изучение режимов работы и эксплуатационных параметров колеса и создание технологий упрочнения.

Увеличение показателей надежности и долговечности ступеней достигается путем использования соответствующих износостойких и коррозионностойких материалов, уменьшения действия радиальных сил на ротор, уменьшения осевой силы на рабочие колеса, усиления пары трения осевой и радиальной опор, использования соответствующих износостойких и коррозионностойких материалов,

Так, согласно ТУ 3665-004-00217780-98 надежность насосов ЭЦНД в условиях эксплуатации должна характеризоваться следующими значениями показателей:

- средняя наработка до отказа не менее - 26400 час,
- средний ресурс до капитального ремонта, не менее -28000 час,
- срок службы до списания насосов, не менее - 4 лет.

Под отказом насоса следует понимать нарушение его работоспособного состояния, не связанного с отказом других составляющих элементов установки погружного центробежного насоса и скважинного оборудования.

Таким образом, долговечность определяет сроки, время работы, поэтому и способы повышения надежности и долговечности различные. С другой стороны долговечность является одним из показателей надежности.

При нарушении условий эксплуатации — рабочего режима регулированием подачи от открытой задвижки — всплывшее рабочее колесо может не опуститься в нижнее положение и будет работать с опорой на верхнюю пяту. С точки зрения увеличения надежности насоса верхняя пятя является элементом колеса требующего увеличения долговечности. Рабочее колесо работает на верхней пяте кратковременно напускных режимах и на режимах, лежащих правее рекомендованного диапазона подач, т.е. в режимах возможного всплытия рабочего колеса.

Здесь имеет место жидкостное трение, но в связи наличием твердых частиц это приводит к интенсификации износа и усилению гидро-абразивного изнашивания.

Трение в верхней пяте рабочего колеса более значительные, чем трение нижней пяты из-за меньшего перепада давления, как следствие, ухудшение смазки поверхностей. Появляется изнашивание поверхности каналов, контактирующих с жидкостью, которое возникает в случае применения жидкостей, с содержанием механических примесей с твердостью выше твердости материалов СН.

В насосных аппаратах ЭЦНИ, ЭЦНК, ЭЦН используются идентичные ступени с одинаковыми проточными частями. Ступени в насосах разных исполнений отличаются друг от друга различными конструктивными элементами, материалами рабочих колес и пар трения.

Для повышения долговечности насосных аппаратов при отборе жидкости с большим содержанием механических примесей, в конструкцию насоса могут быть внесены следующие изменения:

1. Чугунные колеса заменяют пластмассовыми из полиамидной смолы или углепластика не набухающей в воде и стойких износустойчивых к абразиву. Как показал опыт, в скважинах с большим содержанием нефти, они менее работоспособны.
2. Используется двухопорная конструкция рабочего колеса, вместо одноопорной
3. В аппарате направляющем, опорой для резиновой шайбы является стальная термообработанная втулка, а текстолитовая опора рабочего колеса заменена на резиновую.

4. Для увеличения долговечности ступиц рабочих колес и вала устанавливаются дополнительные (промежуточные) радиальные опоры, которые сопротивляются на изгиб при вращении вала.

В результате уменьшаются усилия у радиальной опоры колеса в направляющем аппарате. В результате этих изменений базовой конструкции насоса, срок службы износостойкого насоса увеличивается до 2,5 раз.

Существенные отличия имеются у насосной ступени, разработанной и изготавливаемой «Новомет» (рис. 6).

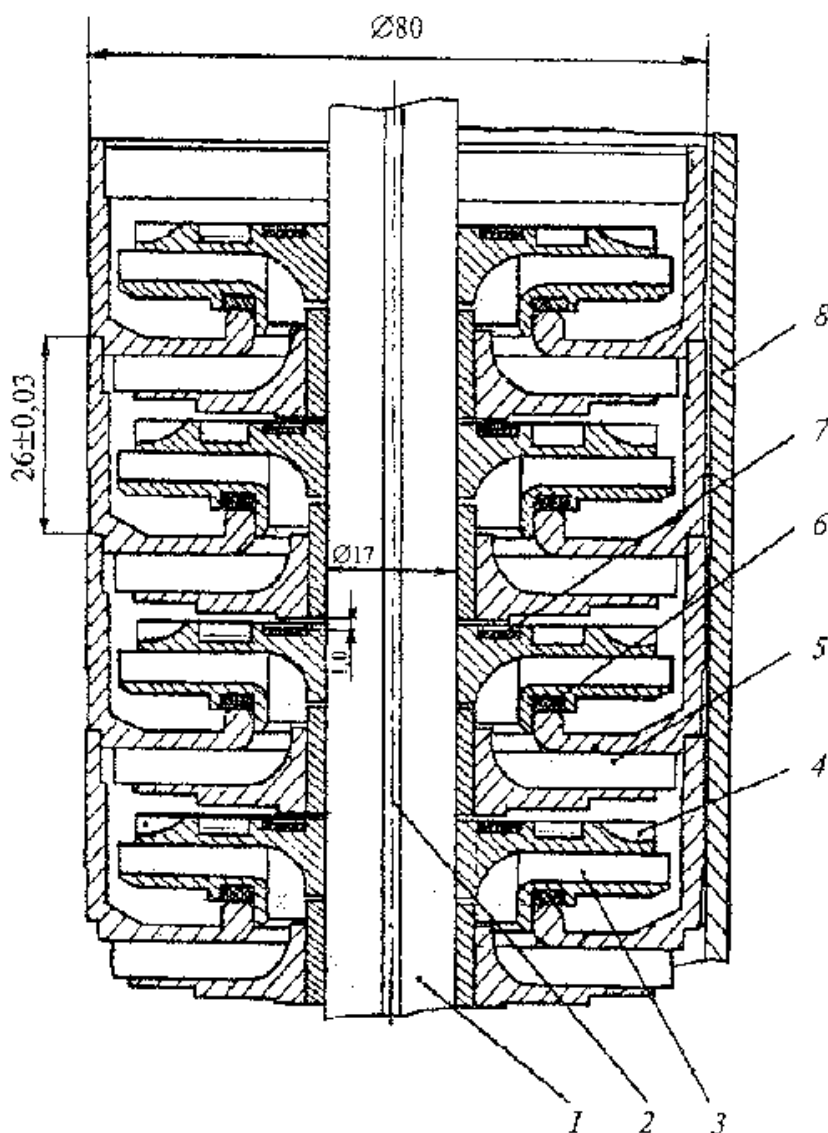


Рис.6. Ступени центробежно-вихревого насоса фирмы «Новомет»

1- вал; 2- шпонка; 3- рабочее колесо; 4- радиальные лопатки;

5- направляющий аппарат; 6- нижняя опорная шайба; 7- верхняя опорная шайба; 8- корпус насоса.

Данная конструкция обладает рядом преимуществ: во-первых, на 15—25% увеличивается напор ступени, что позволяет либо уменьшить длину насоса при постоянной величине напора, либо увеличивать напор насоса при сохранении длины насоса. Во-вторых, наличие вихревой ступени обеспечивает гомогенизацию смеси (ГЖС), что позволяет работать насосу с увеличенным содержанием свободного газа на приеме (до 35% по объему). В - третьих, наличие лопаток на диске уменьшает величину осевой нагрузки, воздействующей на рабочее колесо, что увеличивает долговечность нижней опорной шайбы 6 рабочего колеса. Рабочее колесо 3 имеет на заднем диске радиальные лопатки 4, которые вместе с нижним диском направляющего аппарата 5 образуют упрощенную конструкцию вихревого насоса. КПД и надежность насоса фирмы «Новомет» повышает и то, что рабочее колесо выполняется методом порошковой металлургии.

Метод состоит в раздельном прессовании деталей изделия из шихты на основе железа, сборки деталей через промежуточный слой и совместном диффузионном спекании шихты на основе железа, содержащей медь или медный сплав[4].

### **1.1.3. Технические характеристики насосов**

Основные параметры технических условий на центробежные насосы для добычи различных жидкостей и нефти приведены в [1]. Технические характеристики некоторых типоразмеров электроприводных центробежных насосов для добычи нефти, изготавливаемых российскими фирмами, показаны на рис. 7,8. Характеристики насосов обычного, коррозионностойкого, теплостойкого и коррозионно-теплостойкого исполнений одинаковы. В случае износостойкого исполнения (например, для скважин с высоким содержанием твердых частиц – 500 мг/л и более) могут применяться другие схемы[5].

Характеристики представлены при испытаниях на воде плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup> при частоте вращения вала насоса 2820 1/мин. Более подробная информация по характеристикам центробежных насосов для добычи нефти приведена в [2].

Как видно на приведенных рисунках, напорная характеристика ЭЦН, возможна как с переменным знаком производной, так и с западающей левой ветвью характеристики (малодебитные насосы), монотонно падающей (в основном для среднедебитных установок). Такими параметрами как правило, обладают высокодебитные насосы (рис.7). Более подробно характеристики центробежных насосов рассмотрены и представлены в Международном трансляторе «Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти»[6].

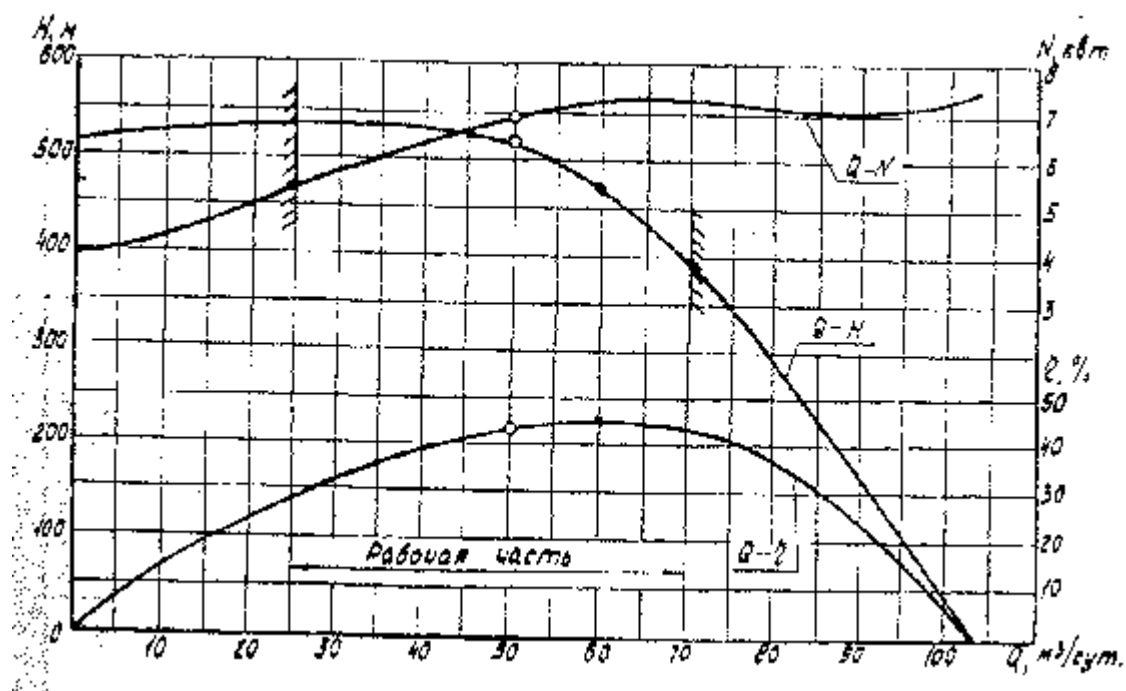


Рис. 7 Характеристика насосов ЭЦНМ5- 50 и ЛЭЦНМ5- 50

Количество ступеней- 100 шт.

Мощностные параметры практически всех насосов имеют минимальный показатель при нулевой подаче (так называемый «режим закрытой задвижки»), что связано с применением обратного клапана в колонне НКТ над насосом.

Рабочая часть характеристики ЭЦН, рекомендуемая фирмами-изготовителями, очень часто не совпадает с рабочей частью характеристик, определяемой общими методиками насосостроения.

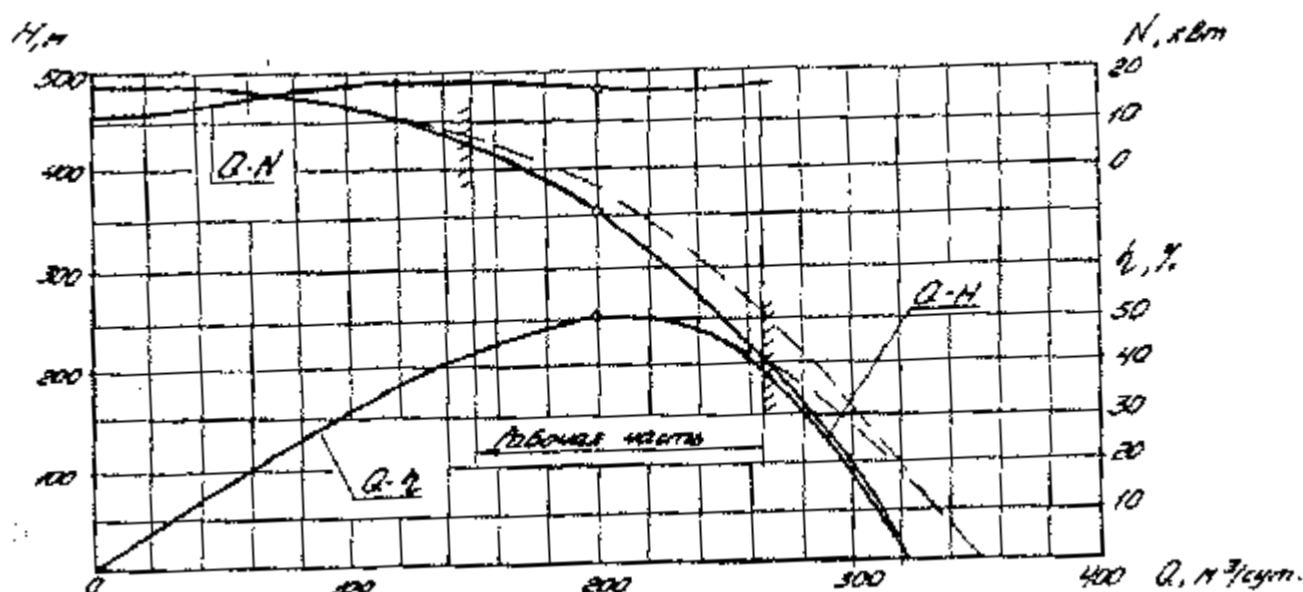


Рис.8 Характеристика насосов ЭЦНМ5- 200 и ЛЭЦНМ5- 200

Количество ступеней- 100 шт.

В последнем варианте границами рабочей части параметров являются величины подач в  $(0,7—0,75) Q^0$  и  $(1,25—1,3) Q^0$ , где  $Q^0$  — подача насоса при максимальном значении КПД. Необходимо отметить и то, что в шифрах погружных электроприводных насосов очень часто указывается не оптимальная подача насоса, а так называемая «номинальная подача», хотя этот термин не является узаконенным в насосостроении.

Для выбора границ работы насосов используются данные приведенные на рис. 7,8.

Однако достаточно низкие наработки на отказ этих насосов могут быть объяснены тем, что правая граница рабочей части характеристики насоса выходит за значение  $1,29 Q^0$ . Работа насоса при этом (при подачах по смеси «жидкость + газ» более  $208 \text{ м}^3/\text{сут}$ ) может сопровождаться «всплыванием» рабочих колес и достаточно быстрым их износом. Другим примером, иллюстрирующим неправильно выбранные границы рабочей части характеристики, является искусственно сдвинутая в область малых подач нижняя граница рабочей части насоса ЭЦНА5-45, выпускаемого ОАО «Алнас». Использование нефтяниками этих насосов при подачах в  $18—25 \text{ м}^3/\text{сут}$ , что допускается разработчиками насоса, приводило к работе установки с низким КПД, повышением температур двигателя и кабеля, а малая скорость течения



пластовой жидкости в зазоре между насосной установкой и стенкой обсадной колонны не позволяла обеспечить нормальное охлаждение узлов установки.

Группой разработчиков ЭЦН из ОКБ БН-КОННАС и фирмы «Новомет» [7] на VIII Всероссийской технической конференции «Производство и эксплуатация УЭЦН» в г. Альметьевске были даже сделаны выводы по определению границ рабочей области характеристик погружных центробежных насосов, которые они предложили использовать всем производителям этого вида оборудования.

1. Правая граница рекомендуемой рабочей зоны определяется в первую очередь всплытием рабочего колеса. Работа насоса правее этой границы допустима, но происходит с пониженной экономичностью и большим износом верхней опоры.
2. Для ступеней с западающей левой ветвью напорной кривой левая граница рабочей зоны определяется подачей, меньше которой начинается снижение напора. Работа левее левой границы недопустима.
3. Ступени с параллельным оси абсцисс участком напорной кривой допускают работу левее левой границы только при условии стабильности динамического уровня в скважине.
4. Положение левой границы рабочей зоны может определяться сроком службы нижнего упорного подшипника, износ которого возрастает из-за увеличения осевой силы, действующей на рабочее колесо, и ухудшения условий охлаждения по мере снижения подачи насоса.
5. Дополнительный нагрев перекачиваемой жидкости в результате выделения энергии в насосе и электродвигателе может достигать в ряде установок существенной величины. Это один из факторов, влияющих на работоспособность питающего кабеля и должен приниматься во внимание при назначении левой границы рабочей зоны.
6. Было бы желательно, чтобы разработчик насосов указывал в документации основную причину ограничения рабочей зоны. В этом случае для потребителя были бы в определенной мере прогнозируемы последствия, к которым приведет работа насоса вне зоны.

## **Вывод:**

### **1. Проведен анализ основных насосных агрегатов.**

**2. Рабочее колесо в сравнении с другими конструктивными элементами насоса испытывает максимальный уровень нагрузок, связанных с одновременным воздействием на него сил, возникающих при вращении и сопутствующих колебаниях, а также при взаимодействии со скважинной жидкостью.**

#### **Рабочее колесо:**

- является главной частью центробежного насоса;
- обеспечивает бесперебойную подачу жидкости;
- в большинстве случаев колеса определяют срок службы насоса.

## **1.2. Изучение возможности увеличения долговечности агрегатов на основе анализа уровней износа деталей и узлов агрегатов**

На первом этапе решения задачи о возможности увеличения долговечности агрегатов целесообразно рассмотреть аналитические исследования, выполненные ранее [8,9].

### **1.2.1. Анализ работы УЭЦН и ее основных частей**

Применение УЭЦН повсеместно распространено при разработке месторождений полезных ископаемых подземным и открытым способами, в подавляющем большинстве случаев сопровождается поступлением воды в горные выработки, а также для добычи нефти.

В различных добывающих предприятиях Западной Сибири применяют УЭЦН производства «Новомет», ОАО «АЛНАС»[10], ООО «Борец»[12] ОАО «Лемаз»[11], и некоторых других заводов, с подачей 25 – 500 м<sup>3</sup> в сутки. УЭЦН импортного производства представляют лидирующие компании на рынке, такие как компания Centrilift, входящая в «Бейкер Хьюз»[14], Reda, которая входит в состав крупной сервисной компании Schlumberger[13]. Эти компании поставляют почти 100% импорта насосов в Россию. Небольшая доля продаж приходится на малых

поставщиков, включая ESP Inc. Наибольшую популярность получили такие типы УЭЦН как: 5А-35 (325 шт.), 6-100 (217 шт.), 5-80 (122 шт.) и 5-50 (85 шт.). Из зарубежных установок большое распространение получили насосы компании Reda (127 шт.). В целом процентзарубежного оборудованиясоставляет около 19 % используемого парка насосовдобывающих предприятиях.

Анализ и мониторинг работоспособности установок Самотлорского месторождения показал, что насосные установки, при эксплуатации выходят из строя не в результате износа, а в результате выхода из строя конструктивных частей.Разрушения наблюдаются по секционным соединениям насосных секций, по телу газосепаратора и др..

Рассмотрим отказов УЭЦН - так называемые РС-отказы или «полеты» на забой нефтяной скважины.

Таблица 3

Количество отказов УЭЦН по ОАО «ТНК-Нижневартовск» по годам

| №  | Причины                                   | 2014 г |      | 2015 г |      |
|----|-------------------------------------------|--------|------|--------|------|
|    |                                           | Кол-во | %    | Кол-во | %    |
| 1  | Механические повреждения питающего кабеля | 19     | 6,2  | 16     | 6,0  |
| 2  | Засорение мехпримесями                    | 86     | 27,9 | 60     | 49,1 |
| 3  | Соли                                      | 4      | 1,3  | 6      | 2    |
| 4  | Пропанат                                  | 32     | 10,4 | 29     | 25   |
| 5  | Негерметичные НКТ                         | 4      | 1,3  | 3      | 1,1  |
| 6  | Прочие                                    | 9      | 1,3  | 3      | 1,1  |
| 7  | Бесконтрольная эксплуатация               | 13     | 4,2  | 1      | 0,4  |
| 8  | Износ рабочих колес                       | 67     | 21,8 | 56     | 28   |
| 9  | Отказ гидрозащиты                         | 0      | 0,0  | 1      | 0,4  |
| 10 | Бесконтрольный вывод на режим             | 2      | 0,6  | 1      | 0,4  |
| 11 | Отказ кабеля                              | 1      | 0,3  | 6      | 2    |
| 12 | Некачественная подготовка скважины        | 3      | 1,0  | 1      | 0,4  |
| 13 | Причина не установлена                    | 5      | 1,6  | 0      | 0,0  |
| 14 | Некачественный монтаж                     | 3      | 1,0  | 1      | 0,4  |

|    |                        |     |     |     |     |
|----|------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 15 | Высокий газовый фактор | 11  | 3,6 | 2   | 0,7 |
| 16 | Высокий газовый фактор | 4   | 13  | 0   | 0,0 |
| 17 | Коррозия               | 2   | 0,6 | 0   | 0,0 |
| 18 | Отказ ЭЦН              | 4   | 1,3 | 2   | 0,7 |
|    | ИТОГО:                 | 269 |     | 196 |     |

За указанный период исследования с 2014 по 2015 г. зафиксировано 239 РС-отказов (расчленения секций) по 26 типоразмерам УЭЦН, в т.ч. по 4 типоразмерам иностранных УЭЦН (R5, R22, RA47, RC5) после ремонта. К часто наблюдаемым отказам по расчленению секций ЭЦН относятся: слом по телу газосепаратора, (в 25% случаев); расчленение по фланцевому соединению «верхняя секция - нижняя секция насоса» (в 12 %), по фланцевому соединению «верхняя секция - средняя секция насоса» (11 %), по «0» патрубку (7%), по подвесному патрубку (5 %) и по шейке газосепаратора (4 %); износ рабочих колес. В добывающих предприятиях № 1 «ТНК-ВР» зафиксировано 106 РС-отказов (44,4 % от всех отказов), в добывающих предприятиях № 2 ТНК -133 «полета» (55,6 %). Из 239, отказавших УЭЦН, 207 установок подверглись ремонту, 32 установки новые. Из отказавших УЭЦН производства ОАО «Лемаз» - 6 установок (18,75 %); ОАО «Борец» - 2 установки (6,25 %); ОАО «АЛНАС» - 20 установок (62,5 % от новых); иностранного производства - 4 установки (12,5 %).

Следует заметить, что представленные данные имеют отчасти условный характер. Так, например, межсекционные разрушения имеют некий комплекс ряда причин.

В то же время углубленный анализ таблицы 3 показывает, что такие весомые факторы, как “пропанат”, “засорение мехпримесями” и др. связаны с износом рабочих колес.

Видно, что большое количество отказов ЭЦН вызвано вследствие отложения солей на рабочих колесах и других элементах ЭЦН. При работе ЭЦН рабочие колеса насоса нагреваются, и на их поверхностях образуются соленые налеты как накипь, которые, впоследствии увеличиваясь, уменьшают проходные диаметры

отверстий. Содержание солей в пластовых слоях незначительное, но, тем не менее, соли содержатся и в воде и в нефти.

В отказавших УЭЦН использовались рабочие колеса из чугуна в 173 установках (72 %), из полиамида - в 19 установках (7,9 %), из нерезиста - 13 установках (5,4 %), в 29 установках материал рабочих колес не установлен, так как ревизия не проводилась. Количество отказов за 2014-2015 гг. приведено в табл. 3.

Тем не менее из анализа таблицы видно, что большое число отказов связано с засорением установки механическими примесями (22-27 %) и из-за недостаточной организации процесса эксплуатации УЭЦН (13-27 %).

В работе [8] изучены законы распределения наработок между отказами для различных типов УЭЦН. Для анализа были проанализированы данные добывающих предприятий связанные с отказами ЭЦН более чем за десяти летний срок эксплуатации.

Проведен анализ однородности базового статистического материала для возможности обобщения полученной информации в единую выборку с целью проведения последующих исследований, выявления сильно выделяющихся наблюдений, доверительных интервалов значения показателя надежности с вероятностью 0,8.

Вывод: полученные данные схожи с теоретическими. Степеней свободы  $\nu=4$ , значимость равна 0,3117, критерий  $\chi^2$  - 4,77. В связи с этим можно принять нулевую гипотезу, в соответствии с результирующими уровнями значимости двух критериев.

### **1.2.2. Анализ работы погружных центробежных насосов с рабочими колесами выполненными из полиамида, нерезиста и чугуна.**

Проведен анализ наработанных на отказ двух сот пяти электро-центробежных насосов (ЭЦН), где ЭЦН с рабочими колесами, выполненными из: полиамида - 19 штук; нерезиста - 13 штук и чугуна - 173 шт. (данные приведены в табл. 4).

Таблица 4. Выработка до отказа ЭЦН аварийного фонда скважин, в зависимости

от рабочих колес.

| Типоразмер                       | Количество<br>отказавших<br>ЭЦН | Выработкадо отказа, сут. / количество<br>расчленения секций |           |          |               |              |             |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------|----------|---------------|--------------|-------------|
|                                  |                                 | Материал рабочих колес                                      |           |          |               |              |             |
|                                  |                                 | Чугун                                                       |           | Полиамид |               | Нерезист     |             |
|                                  |                                 | нов.                                                        | рем.      | Нов.     | рем.          | нов.         | рем.        |
| 5-20                             | 12                              | 108-245                                                     | 73-654    | -        | 163           | -            | -           |
| 5-30                             | 4                               |                                                             | 184-388/2 |          | 163-478/2     |              |             |
| R5                               | -                               | -                                                           | 332/1     | -        | -             | -            | -           |
| Rc5                              | -                               | -                                                           | -         | -        | -             | -            | 334         |
| 5-50                             | 55                              | 60-450                                                      | 18-332    | -        | 240-848       | -            | 260         |
| 4-50                             | 1                               | -                                                           | -         | -        | -             | 12/1         | -           |
| 5-60                             | 4                               | 216/ 1                                                      | -         | -        | -             | 45-122/<br>2 | 150/1       |
| 5-80                             | 60                              | 127-196                                                     | 6-771/ 48 | -        | 114-364/<br>5 | 226/ 1       | 23-68/<br>2 |
| 5-125                            | 20                              | 30-360 5                                                    | 35-275/13 | -        | 149-579/2     | -            | 22/ 1       |
| 5A-160                           | 12                              | 1                                                           | 7-198/ 11 | -        | -             | -            | 201/1       |
| 5A-200                           | 13                              | -                                                           | 4-250/ 7  | 152/1    | 166-315/3     | -            | 45-87/2     |
| 5A-250                           | 11                              | 230                                                         | 65-328 10 | -        | -             | -            | -           |
| 5A-500                           | 11                              | 271                                                         | 60-250    | -        | -             | -            | -           |
| Среднянаработка<br>наотказ, сут. |                                 | 175,8                                                       | 221,3     | 152      | 263,7         | 108,8        | 154,9       |
| ВсегоотказавшихУЭЦН              | 205                             | 21                                                          | 152       | 1        | 18            | 4            | 9           |
|                                  | 205                             | 173                                                         |           | 19       |               | 13           |             |
| Средняя наработка на отказ       |                                 | 215,8                                                       |           | 257,8    |               | 140,7        |             |

Выработка до отказа ЭЦН с рабочими колесами изготовленных из различных материалов, после ремонта в 2 и более раз не превышает выработку до отказа ЭЦН с новыми колесами. Причина заключается в том, что ремонтные работы по восстановлению не способны обеспечить восстановление исходных свойств рабочих колес.

Выработка на отказ ЭЦН с рабочими колесами изготовленных из полиамида превосходит выработку на отказ ЭЦН с колесами изготовленных из чугуна на 19,4%, а ЭЦН с колесами выполненными из нерезиста превосходит на 83%. Увеличенная выработка на отказ (более пятисот суток) с колесами изготовленных из полиамида, связана с их меньшей массой в сравнении с массой колес изготовленных из чугуна или нерезиста, т.к. из-за массы этих рабочих колес создается значительная вращающаяся масса ЭЦН. Соответственно, чем меньше вес вращающихся масс ЭЦН с дисбалансом, тем меньше вибрационные показатели, и соответственно меньше эксплуатационные напряжения. Следует учесть, что полиамид обладает невысокой температурой применения ( $140^{\circ}\text{C}$ ), что ограничивает его возможности его применения.

Табл. 5 Количество отказавших УЭЦН с разным типом материала рабочих колес:



В таблице 5 и 5.1[9] представлена структура аварий в зависимости от материала рабочих ступеней, где видно, что максимальное количество аварий у колес из чугуна 85,2%, после идет порошковый материал -10%, у нирезиста -9,5%. Изменение количества аварий в зависимости от материалов рабочих колес представлено в таблице 5. Следует отметить, что такие материалы, как углепластик слишком дороги, и в настоящее время в качестве материала колес не могут составить конкуренцию чугуну. Такое различие связано с технологией изготовления, в частности с использованием литейной технологии.

Таблица 5.1. Структура аварий в зависимости от материала рабочих ступеней

| Количество | Материал |                     |                      |             |
|------------|----------|---------------------|----------------------|-------------|
|            | Чугун    | Порошковый материал | Нирезист (Ni-Resist) | Углепластик |
| Аварий, %  | 85,2     | 10                  | 9,5                  | 0           |

Износ поверхности каналов насосов возникает в случае применения насоса, содержащих механические примеси, твердость которых выше твердости материала ступеней.

Поскольку главным источником вибрации оборудования ЭЦН являются вращающиеся элементы насоса, то к исполнению рабочих ступеней должно предъявляться высокое требование. Соответственно, чем больше износ поверхности, тем больше амплитуда вибраций, далее возрастают силы радиального биения, которые передаются по валу всей установки и приводят к усталостному разрушению металла.

В ЭЦН фирм производителей ODI, ESP, Centrilii't и REDA рабочие органы выполнены из нирезиста. В радиальных подшипниках пары трения составляют нирезист (втулка) - К-монель (вал). Помимо этого, поперечные усилия в модульных секциях принимаются ступенными подшипниками, в которых функции выполняют межступенные уплотнения, которые исполнены ступицами рабочими колесами и



проточками направляющих аппаратов. Материал из керамики используется для промежуточных подшипников иконцевых.

### **Выводы по разделу 1.2.**

**1. Анализ работы ЭЦН и ее основных частей показал, что частым отказам относятся: расчленение соединению из фланца «нижняя секция иверхняя секция насоса»;по соединению из фланца «средняя секция и верхняя секция насоса» по «0» патрубку, по подвесному патрубку и по шейке газосепаратора; изломгазосепаратора по телу; сломнасосно-компрессорных труб (НКТ) по резьбе,телу и муфте.**

**2. Анализ аварий в зависимости от материала рабочих органов: максимальноечисло аварий приходится на колеса, изготовленные их чугуна 85,2 %, затем идут порошковый материал для обычных условий - 10,0 %, нерезист - 9,5 % и углепластик - 0,0 %. В связи с тем, по совокупности факторов чугун как материал колес остается наиболее рациональным вариантом. Актуальной является задача совершенствования технологии получения колес из чугуна.**

### **1.3. Изучение возможности повышения характеристик погружных насосов.**

Основными элементами погружного насоса является рабочее колесо с лопатками посаженное которое располагается на валу; аппарат, где располагается колесо и неподвижный корпус, изолирующий колесо и аппарат от внешней среды (рис. 9).



Рис. 9. Рабочее колесо и аппарат направляющий.

В отличие от поршневого насоса, центробежный нельзя запускать в работу без заглушки, так как центробежная сила, которая возникает при вращении колес из-за меньшей плотности воздуха (по сравнению с плотностью жидкости) не достаточно для создания нужного разрежения. В связи с этим перед пуском насоса корпус и всасывающий трубопровод должны быть заполнены жидкостью.

Передача энергии потоку жидкости от вала осуществляется при помощи колеса с профилированными лопатками. Это колесо, называемое рабочим, является главной частью центробежного насоса (рис.10).



Рис.10. Центробежный насос

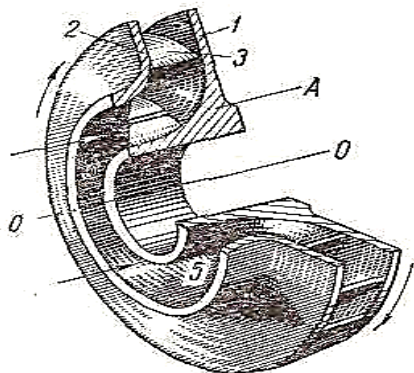


Рис.11. Установка погружных насосов



Рис. 12 Рабочее колесо в разрезе

Внутренняя полость рабочего колеса образуется двумя фасонными дисками 1 и 2 и несколькими профилированными лопатками 3. Основной диск имеет ступицу и жестко насажен на вал. Жидкость (газ), поступающая в полость 5 рабочего колеса, вращается вокруг центра О с некоторой угловой скоростью. При работе рабочего колеса жидкость, которая находилась в насосе, засасывается лопатками (3) и под воздействием центробежной силы перемещается из центра к периферии вдоль лопастей и попадают в канал вокруг рабочего колеса. На входе в рабочее колесо где всасывающая труба примыкает к корпусу создается разрежение, под воздействием которого жидкость засасывается в насос. В результате этого обеспечивается постоянное перемещение жидкости из скважины через всасывающую трубу (кожух) (рис.11).

При работе насоса, износ происходит по рабочим органам, т.к. именно они в большей степени подвергаются воздействию различных абразивных примесей (песок, мелкий гравий и т.п.), которые входят в состав добываемой жидкости.



Геометрическая сложность конструкции определяет необходимость их изготовления только с помощью литья или порошковой металлургии.

Литейная технология является более дешевой по сравнению с порошковой, но нуждается в совершенствовании для придания необходимых свойств поверхности.

Детали рабочих органов могут быть изготовлены с помощью различных технологий, например, путём литья в землю (из чугуна). Основным видом брака при литье является наличие поверхностных дефектов в виде пор и каверн в широком диапазоне размеров (рис.13), что связано с технологическими параметрами литья и использования формовочных и отделочных смесей, не обеспечивающих высокую газопроницаемость и наличие пригаров.



Рис.13 Примеры дефектов при литье

Наличие крупных дефектов указывает на то, что существует значительный потенциал улучшения микроструктурных и эксплуатационных характеристик.

Чтобы оценить этот потенциал и реализовать его, создавая новые технологические процессы, необходимо детальное понимание процессов, протекающих в ответственных деталях ЭЦН во время эксплуатации.

### **Вывод по разделу 1.3.**

**На основе анализа качественных факторов показано, что существует значительный потенциал улучшения макроструктурных и эксплуатационных характеристик рабочих колес, получаемых по литейной технологии**

- 1. Проведен анализ условий работы насоса.**
- 2. Установлено, что наибольшие повреждения приходятся на рабочие колеса.**
- 3. Показано, что использование различных технологий не обеспечивает экономически конструктивного решения.**

### **1.4. Поверхность, трение и износ - общие представления**

Поверхность материала - наиболее сложная его часть[18-22]. Это связано с тем, что поверхность представляет собой переходную область между объемными зонами материала и внешней средой, находящейся в определенном агрегатном состоянии - жидком, твердом или газообразном. Необходимо, однако, заметить, что существует класс материалов, у которых соотношение поверхность/объем характеризуется особыми пропорциями. К таким материалам относятся порошки и частицы с размерами менее 0,1 мкм (наноматериалы[23], аэрозоли и др.). В этом случае большая часть вещества оказывается в пограничной области, а на внутренние зоны приходится незначительная доля материала. Однако в данном случае мы рассматриваем те материалы, в которых в пограничной области находится незначительная доля вещества.

В поверхностных областях структура материала содержится, как правило, значительное количество дефектов, с которых обычно и начинается разрушение материала, особенно в тех случаях, когда материал работает в жестких режимах.

Воздействие на поверхность деталей при их эксплуатации осуществляется за счет различных механизмов трения, что ведет к износу деталей. В свою очередь износ приводит к изменению сначала поверхностных структурных состояний, а при более сильных воздействиях и к объемным необратимым структурным деформациям вплоть до разрушения. По мере углубления процесса износа структура поверхности претерпевает известные трансформации, становясь более развитой и открытой, что ведет к усилению трения.

#### **1.4.1. Скважинная жидкость как гетерогенная многокомпонентная система**

Как указывалось, ранее (п. 1.1.2.), скважинный погружной насос в обычном исполнении применяется для забора жидкости из скважины:

- состав воды допустим до 99%;
- при этом в откачиваемой жидкости процент механических примесей должен составлять не более 0,01% (или 0,1 г/л), а твердость примесей не более 5 единиц по шкале Мооса (баллов по Моосу)
- содержание сероводорода не выше 0,001%.

Исполнение насоса в износостойком варианте дает возможность откачивать жидкость, где состав примесей не более 0,1 г/л.

Среда, с которой взаимодействуют рабочие колеса, может быть охарактеризована как гетерогенная многокомпонентная система сложного состава на основе водных растворов, нефти, твердых и газообразных компонентов. Эта оценка необходима с точки зрения рассмотрения вопросов трения и износа, сопровождающих работу насоса. Следует сделать несколько предварительных замечаний относительно некоторых существенных моментов,

Во – первых, на данном этапе исследований мы не принимаем во внимание вопросы разнообразия составов воды, хотя этот момент может в ряде случаев иметь существенное значение.

Во – вторых, оценка значимости того или иного механизма износа и трения при работе насоса может быть сделана с определенными допущениями, поскольку убедительных экспериментальных данных по этому вопросу мало.

### 1.4.2. Трение [24-27]

При движении двух контактирующих тел, возникающие при их взаимодействии силы трения можно разделить на:

- трение скольжения — это сила, где появляющаяся при поступательном движении одного из контактирующих тел относительно другого и действующая на это тело в направлении, противоположном направлению скольжения;

По физике взаимодействия трение можно подразделить на:

- сухое, когда твёрдые тела взаимодействующие между собой не разграничены какими либо слоями, что редко применяется в практике. Отличительная черта такого трения, это присутствие силы трения покоя.

- жидкостное (вязкое), где тела разделены слоем жидкости или газа (смазки), твёрдым телом (порошком графита) любой толщины. Данное трение бывает при трении качения, где тела погружены в жидкость; см. также вязость.

- смешанное трение, где пятно контакта имеет области жидкого и сухого трения;

- граничное трение, где пятно контакта содержит участки и слои различной структуры (окисные плёнки, жидкость и т. д.). Данный случай популярен при трении скольжения.

Процессы трения не могут быть целиком описаны с помощью методов классической механики из-за сложности физико-химических процессов, которые протекают в зоне фрикционного взаимодействия.

Представляется, что для насосов существенное значение имеет трение, возникающее в результате контакта колеса с жидкой средой с абразивными частицами, хотя и другие виды трения полностью из рассмотрения исключить нельзя.

### 1.4.3. Износ [28-32]

Износ нельзя свести только к механическому процессу, поскольку он осложняется действием широкой гаммы факторов - физико-химических [33-35], физических и химических процессов, вызывающих дефектообразование и уменьшение прочности поверхностного слоя.

При внешнем воздействии на поверхностные слои разделяют следующие виды износа: абразивный, гидроабразивный, кавитационный, эрозионный и др. Износ приводит к снижению функциональных качеств изделий и к потере их потребительской ценности. Повышению долговечности деталей способствует использование материалов с большой износостойкостью, так же различные конструктивные методы, обеспечивающие резервирование износостойкости, компенсацию износа, и другие улучшения среды трения (использование качественных смазочных материалов, защищающих от абразивного воздействия).

### **Классификация основных видов изнашивания.**

Классификация видов износа описывается факторами, которые являются определяющими для обеспечения работы насоса.

Различные виды изнашивания по признакам основных явлений, обуславливающих эффект этого явления можно разделить на группы:

- механическое;
- физико- химическое;
- коррозионное;
- кавитационное.

Следует отметить, что между этими группами не всегда можно провести четкую границу, правильнее говорить о взаимопроникновении и взаимозависимости разных групп друг от друга.

В деталях насосной установки, по нашему мнению, основным видом изнашивания является механическое изнашивание, хотя и некоторые другие виды изнашивания могут иметь место.

Основным видом износа является абразивное изнашивание, где износ поверхности происходит в следствии царапающего или режущего воздействия частиц. Этот вид износа состоит в удалении части материала с изнашиваемой поверхности или в виде съема мельчайшей стружки, либо в виде дисперсных частиц, которые отделяются при многократном воздействии металла, выдавленного пластически деформированной царапины.



Абразивный износ характерен для насосных установок в силу наличия в скважинной жидкости твердых частиц, а также горно-обоганительного оборудования, где рабочие органы непосредственно взаимодействуют с транспортируемыми, добываемыми и перерабатываемыми горными породами.

На процесс абразивного износа влияют следующие факторы:

- концентрация абразивных частиц и их природа происхождения;
- свойства поверхности которые подвержены износу;
- ударное взаимодействие;
- нагрев и прочие факторы;
- среда с которой взаимодействуют детали.

*Изнашивание твердыми частицами* - при контакте с поверхностью частицы (зерна) упруго деформируют металл, но остаются при этом целыми или разрушаются. При перекачке жидкости, абразивным зерном является частица твердой фазы. Также зерна могут вдавливаться в поверхность металла, повернуться или же выйти из контакта, оставив след.

*Износ при ударе абразивных частиц* - это взаимодействие называется ударно-абразивным износом, где присутствуют много факторов, таких как геометрическая форма и природа, твердость частиц, толщина абразивного слоя, сила удара, твердость поверхности, присутствие какой-либо жидкости в зоне взаимодействия и т.д. Возможно предположить, что данный износ возможен в насосах при больших концентрациях твердой фазы.

*Износ в зонах пар трений.* Частицы, находящиеся в зазорах пар трений участвуют во взаимодействии прикладываемой нагрузки и могут расчленяться на мелкие фракции, внедряться в поверхность трения, скользить вдоль поверхности, приводя к пластической деформации.

*Износ в потоке газа или жидкости.* В данном случае взаимодействие детали происходит под разными углами жидкости или газа. Изнашивание зависит от скорости падения частиц, их массы, самого абразива и свойств металла. Помимо этого на поверхности детали возможно возникновение упругой деформации или пластической, хрупкое разрушение, наклеп со слоением металла в виде чешуи.

*Физико- химическое* изнашивание связано с протеканием процессов химического взаимодействия в условиях физического соприкосновения.

*Коррозионно-механическое* изнашивание – это механическое изнашивание, осложненное явлениями коррозии. В работе колес насосов этот вид износа обусловлен рядом факторов – агрессивной водной средой с сильноокислой реакцией, высокой температурой и давлением, возможностью осаждения солей на поверхности колеса и др. факторами.

#### **1.4.4. Коррозия[36]**

В настоящем разделе акцент сделан на тех видах коррозии, которые могут иметь место при работе насосов.

*Коррозияхимическая*– проходит при взаимодействии сухих газов с металлами или парами и жидкими не электролитами.

*Коррозияэлектрохимическая*– характеризуется неоднородностью металла в связи с электролитом, также протекает при действии на металлы жидких электролитов.

Коррозия не всегда ведет непосредственно к изнашиванию, а скорее интенсифицируют процесс механического изнашивания, кроме фреттинг-коррозии, которая является особым видом изнашивания плотно сопряженных деталей, под нагрузкой, которая возникает при не большихповторяющихсяперемещениях(продольные вибрации с амплитудой 0,025 мкм).

Коррозионно-механическому виду изнашивания подвержены выпускные клапаны, цилиндры двигателя внутреннего сгорания, камеры сгорания, некоторые конструктивные элементы паровых котлов и пароперегревателей, различная арматура нагревательных печей и детали насосов.

*Окислительный износ*рассматривается как одна из разновидностей коррозионного износа.Отсутствует агрессивная среда, процесс износпроходит при нормальных или повышенных температурах с трениемв отсутствии смазки.

Окислительный износ возникает в случае если на контактирующих деталях появляются пленки окислов и в процессе трения разрушаются и образуются вновь; продукты же износа состоят из окислов.

*Кавитационное изнашивание* [37-39] – представляет собой явление, возникающее в потоке жидкости парогазовых пузырьков, там, где давление снижается до уровня давления паров жидкости при соответствующей температуре и последующее сокращение этих пузырьков при их перемещении в зону более высокого давления. Кавитационное разрушение материала вызывается гидравлическими импульсами ударного характера, которые возникают при быстром сокращении парогазовых пузырьков, попадающих в область более высокого давления. Наиболее высокой разрушающей способностью обладают кавитационные полости с минимальными размерами. С увеличением содержания в кавитационной полости газа или паров жидкости возрастают ее размеры. Кавитационные полости больших размеров не разрушают материал, т.к. при их замыкании давление на единицу площади не велико.

Существует и другое представление о механизме кавитационного разрушения, по которому материал на микроучастках поверхности в момент захлопывания кавитационных пузырьков работает не на удар, а на отрыв. В данном случае причиной разрушения материала являются высокочастотные импульсы микрообъемов жидкости отрывного характера.

Явление кавитации, как правило, наблюдается при скоростях, создающих в потоке турбулентное движение жидкости. Возникающие при этом пустоты заполняются растворенными в жидкости парами и газами. Образовавшиеся кавитационные полости перемещаются вместе с потоком жидкости и попадают в область с более высоким давлением, где сокращаются и исчезают. Процесс сжатия кавитационной полости совершается с большой скоростью и сопровождается гидравлическим ударом. Такие удары могут вызывать разрушение материала в микрообъемах, если сила микро-удара превышает предел прочности материала отдельных микро-участков. Явление кавитации наблюдается также при вибрации твердого тела в жидкости. В загрязненном потоке кавитирующее действие жидкости

может усиливаться за счет способности твердых частиц разрывать жидкость, т.е. создавать полости в потоке. Усиление кавитирующего действия жидкости происходит также с повышением ее температуры. Однако, разрушающая способность увеличивается только до температуры 44-45<sup>0</sup>С, а затем резко падает. Это объясняется тем, что при температуре близкой к температуре кипения кавитационные пузырьки образуются с большой интенсивностью, а их размеры увеличиваются вследствие повышения газонасыщенности потока и уменьшением объемной прочности жидкости. Сокращение таких кавитационных пузырьков приводит к гидравлическим ударам, действующим на относительно большие участки поверхности, поэтому напряжения, возникающего на этих участках оказывается недостаточным для разрушения металла.

Для возникновения явления кавитации необходимо как минимум наличие следующих условий при движении жидкостей. Это турбулентность потоков и скоростей их движения, достаточных для разрыва жидкостей. Следует заметить, что величина скорости потока, которая приводит к разрыву жидкостей и созданию кавитационных полостей может меняться в зависимости от вязкости жидкости, ее объема, температуры, наличия растворенных газов и твердых примесей. При этом наличие в жидкости большого количества твердых примесей приводит к гидроабразивному износу поверхности, а при малом их количестве к обычному кавитационному изнашиванию. Вместе с тем, изнашивание поверхности материала происходит не только от кавитационного действия жидкости, но и от ее обычных ударов, при которых каждая частица жидкости действует локализовано и при определенной величине скорости ведет себя как твердое тело. В данном случае разрушение может быть следствием обычных ударов микрообъемов жидкости, если напряжение от удара превышает прочность металла на отдельных микроучастках. Если же не превышает, то создает предпосылки при следующих ударах.

*Микроструктурное изнашивание* является проявлением протекания в материале процессов преобразования его структуры- развития дислокационной структуры, роста микрокристаллитов (зерен), образования трещин - от локальных до

магистральных; протекания фазовых превращений; образования и роста объемных дефектов – пор и др.[40-42].

*Усталостный износ*—этот вид микроструктурного износ, возникает в деталях, которые подверглись долгой нагрузке усилиями, как переменными по направлению так и по величине. Усталостные микротрещины начинаются с поверхности трения и уходят в глубь. Разрастаясь в длину, микротрещины образуют сетку на определенных участках. Раскрытие микротрещин и трещин протекает под воздействием давления смазочного материала. На позднем этапе трещина, достигая основы антифрикционного слоя изменяет направление, двигаясь по стыку между основанием и слоем, после чего некоторые участки поверхности обособляются от другого слоя и после выкрашиваются. Не маловажное значение отделения частиц играет смазка, которая, попав в трещину подрывает металл. Бывает, что трещина не распространяется до стыка и развивается возле него или параллельно. Выкрашивание определенных элементов слоя может образовывать поверхностные язвы.

Усталостное разрушение делится на следующие стадии:

- разрыхление. В зернах, с максимальными напряженными объемами, в результате сдвигов, образуются линии скольжения, где образуются поры и субмикроскопические трещины, которые развиваются до микроскопических параметров;
- инкубационная. В результате повторяющихся циклов, в зернах образуются нагруженные полосы скольжения, также в объемах скапливаются дефекты структур,
- увеличение микротрещин в результате сосредоточения напряжения из концов, до критического параметра (макротрещин).
- полное разрушение в следствии произвольного распространения макротрещин в образцах с малым размером или же хрупкого материала.

В случае усталостного разрушения по границам зерен, возможен процесс завершения до образования широких полос скольжения.

Рост микротрещин может иметь место в базовом материале или же при не больших циклических или статических нагрузках. Под воздействием нагрузок переменного типа, больше предельного диапазона, на максимально напряженном участке поверхности появляются трещины, где дальнейшее изменение связано с характером контактов.

Усталостный износ зависит от конструкции детали, режимов работы и физических свойств покрытия и материала и т.д.

Усталостное изнашивание характерно и для деталей насосов, которые подвергаются длительному нагружению переменными по направлению и величине усилиями.

#### **1.4.5. Долговечность и надежность оборудования.**

Решение практических задач на основе изучения трения износа и смазки подчинено одной цели – увеличению долговечности машин и механизмов. Новые стандарты систем производственных процессов, увеличение рабочих температур, давлений и скоростей, приводит к ускоренному изнашиванию как отдельных деталей, так машин и механизмов в целом, и в сочетании с необходимостью автоматизации производства, делает проблему повышения долговечности машин еще более острой.

Борьба с преждевременным износом деталей оборудования в горной промышленности, добывающей и перерабатывающей минеральное сырье, имеет наибольшее значение. Технологические процессы в горном деле характеризуются непрерывностью и многотоннажностью добываемого и перерабатываемого сырья, большой величиной производительности отдельных комплексов, поэтому проблема повышения долговечности в горной области стоит особенно остро.

Долговечность – свойство объекта сохранять рабочее состояние до предельного уровня при определенной системе сервисного обслуживания и ремонта.

Под предельным состоянием, понимается состояние объекта (механизма, машины, агрегата), при котором его дальнейшая эксплуатация должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований:

- безопасности;
- невозможности выполнения заданных параметров;
- снижения эффективности эксплуатации ниже допустимой;
- проведения среднего или капитального ремонта.

Признаки предельного состояния устанавливаются нормативно-технической документацией на данный объект. Долговечность можно подразделять на:

- физическую;
- моральную;
- технико-экономическую.

Под физической долговечностью понимают продолжительность работы машины до разрушения или предельного состояния базовой детали.

Моральный износ – срок службы машины до появления более совершенной конструкции машины этого же типа.

Для большинства горных машин моральная долговечность выше долговечности физической в разы. Об этом свидетельствует о быстроте проблемы износа горной техники. Подобное положение складывается только в этой отрасли и является результатом переработки больших объемов абразивной массы.

Технико-экономическая долговечность – продолжительность работы машины от ее ввода в эксплуатацию до того момента, когда общие затраты на эксплуатацию, а также издержки, связанные со снижением производственных функций, превзойдут экономический эффект от использования данной машины.

Долговечность – одно из основных свойств горных машин, зависящее как от качества конструкции, так и от технологии изготовления и эксплуатации.

Согласно ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения»:

- долговечность - свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта;

**ПОКАЗАТЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ:**

- гамма-процентный ресурс- суммарная наработка, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $g$ , выраженной в процентах;
- средний ресурс- математическое ожидание ресурса;
- гамма-процентный срок службы- календарная продолжительность эксплуатации, в течение которой объект не достигнет предельного состояния с вероятностью  $g$ , выраженной в процентах;
- средний срок службы - математическое ожидание срока службы.

Долговечность и надежность, как свойства горных машин, формируются в процессе конструирования и изготовления. Достигаются стабильностью форм, точностью размеров, качеством поверхности, использованием материалов с соответствующими физико-механическими свойствами, применением современных методов расчета, установкой приборов контроля.

Качество трущихся поверхностей и точность размеров деталей должны формироваться на протяжении всего технологического процесса изготовления машины.

Полнота реализации указанных качеств изготовления горных машин определяется горно-геологическими и погодно-климатическими условиями и человеческими факторами, такими как квалификация специалиста, управляющего ЭЦН, качеством технического обслуживания и ремонта

Для повышения надежности горных машин необходимо соблюдать правила эксплуатации, выполнять мероприятия принятой системы обслуживания и ремонта, использовать строго рекомендованные марки смазки для трущихся сопряжений, иметь карты разработанных технологических процессов производства ремонтных работ и обслуживающие нормативы, использовать прогрессивные методы восстановления деталей, иметь высококачественные запасные части и ремонтные материалы.

Межремонтные периоды должны быть равны или кратны срокам службы деталей. В идеальном случае срок службы деталей должен быть одинаков. При заниженных межремонтных сроках повышается стоимость ремонтов, т.к. годные детали заменяют преждевременно, а при завышенных сроках появляется



возможность аварий и преждевременного выхода из строя машины, практически снижается техноэкономическая долговечность использования оборудования.

Приведенные выше положения имеют непосредственное отношение к насосным установкам как к предмету настоящей работы. Например, как указывалось ранее (п. 1.1.2.), в большинстве случаев колеса определяют срок службы насоса. При этом показатели долговечности и надежности насосов оказываются в значительной зависимости от уровня эксплуатационных характеристик колес. Более подробно эти вопросы будут рассмотрены в следующих главах.

#### **1.4.6. Экономические потери от трения и износа.**

Средняя продолжительность жизни стальных изделий, находящихся в употреблении, в значительной степени зависит от условий их эксплуатации.

Трение и износ являются основной причиной выхода из строя большинства машин. Низкий КПД машин обусловлен главным образом большими потерями на преодоление трения. Так КПД, в такой распространенной паре как винт-гайка составляет 0,25, т.е. три четверти прилагаемых усилий тратится на преодоление трения. В связи с этим траты на сервисное обслуживание и ремонт машин в несколько раз превышают ее первоначальную стоимость.

Экономическая целесообразность восстановления деталей горных машин вытекает, прежде всего, из того, что у многих быстроизнашивающихся деталей большой массы в работе участвует только небольшой слой металла, восстановить который во много раз дешевле, чем изготовить новую деталь.

Однако, долговечность деталей, изготавливаемых на машиностроительных предприятиях в 1,8-2,6 раза выше долговечности деталей, изготавливаемых в ремонтно-механических цехах горных предприятий. Это связано, прежде всего, с решением основного вопроса организации ремонтных цехов на горных предприятиях. Процесс добычи, доставки и обогащения полезных ископаемых включает в себя целый комплекс машин, имеющих разнообразные функциональные критерии. Это экскаваторы различных типов, транспортные средства (тепловозы, автомобили, вагоны), различное обогатительное оборудование, поэтому для

обеспечения ремонта всей этой техники в ремонтно-механических цехах необходимо иметь различное станочное оборудование, которое в большинстве случаев используется очень слабо. Коэффициент использования станков в ремонтно-механическом цехе объединения «Фосфаты» составлял 47,5%. Поэтому в ряде случаев стремятся персонал обслуживающего парка обучать на нескольких типах станков в зависимости их загрузки. Это приводит к снижению качества изготавливаемых деталей. В тоже время недостаточная надежность горно-обогатительного оборудования приводит к тому, что темпы роста объемов ремонтных работ значительно опережают темпы роста добычи полезных ископаемых.

В масштабах народного хозяйства повышение долговечности за счет уменьшения трения и износа позволит увеличить эффективность использования материальных ресурсов, производственных мощностей, рабочей силы при производстве и эксплуатации машин.

#### **Выводы по разделу 1.4**

- 1. Основным видом повреждений являются повреждения из-за износа, но определяющим видом является гидроабразивное изнашивание.**
- 2. Наряду с гидроабразивным изнашиванием детали насосов подвержены коррозионно-механическому и усталостному изнашиванию.**

#### **Выводы по главе 1**

- 1. Рабочее колесо в сравнении с другими конструктивными элементами насоса испытывает максимальный уровень нагрузок, связанных с одновременным воздействием на него сил, возникающих при вращении и сопутствующих колебаниях, а также при взаимодействии со скважинной жидкостью.**

**Рабочее колесо:**

- является главной частью центробежного насоса;**
- обеспечивает бесперебойную подачу жидкости;**
- в большинстве случаев колеса определяют срок службы насоса.**

**2. Анализ аварийности в зависимости от материала рабочих ступеней: наибольшее количество аварий приходится колеса, изготовленные из чугуна 85,2 %, затем следует порошковый материал для обычных условий - 10,0 %, нерезист - 9,5 % и углепластик - 0,0 %.**

**В связи с тем, что по совокупности факторов чугун, как материал колес остается наиболее рациональным вариантом, актуальной является задача совершенствования технологии получения колес из чугуна.**

**3. На основе анализа качественных факторов показано, что существует значительный потенциал улучшения микроструктурных и эксплуатационных характеристик рабочих колес, получаемых по литейной технологии.**

**4. Основным видом изнашивания деталей насосов является механическое изнашивание, как результат абразивного воздействия твердых частиц, находящихся в скважинной жидкости. Наряду с механическим изнашиванием, детали насосов подвержены коррозионно-механическому усталостному изнашиванию.**

## **ВТОРАЯ ГЛАВА**

**Разработка технологий поверхностного модифицирования рабочих колес электронасосных агрегатов с целью повышения долговечности и производительности**

**В связи с тем, что разрушения колес начинается с поверхности, рассмотрим возможности упрочнения поверхности. Показано, что существует значительный потенциал улучшения микроструктурных свойств и эксплуатационных характеристик рабочих колес, получаемых по литейной технологии. Вместе с тем, затронутый вопрос требует более полного и глубокого исследования, поскольку он**

непосредственно связан с проблемой разработки технологии поверхностного модифицирования рабочих колес.

При разработке плана работ по разработке технологии поверхностного модифицирования рабочих колес мы исходили из следующих положений. Задача модифицирования становится актуальной в том случае, если существуют данные, указывающие на возможность улучшения эксплуатационных характеристик рабочих колес за счет использования методов поверхностной обработки. Например, при коррозионном или абразивном воздействии на поверхности могут возникать дефекты, которые в дальнейшем становятся причиной разрушения лопатки или колеса. Так, для повышения рабочего ресурса лопаток газовых турбин используют высокотемпературные покрытия [1,2].

Другая возможность состоит в том, что решающее значение при поверхностном модифицировании имеют вопросы физико-химического взаимодействия (адсорбционные эффекты, смачивание и др.) в системе поверхность колеса – модификатор – пластовая жидкость. Например, можно ожидать, что для рабочего колеса, соприкасающегося с пластовой жидкостью, характер взаимодействия поверхность – жидкость и режимы течения в пограничной области будут находиться в значительной зависимости от эффектов смачивания (краевого угла). Управляя этими параметрами, возможно, удастся скорректировать уровень абразивного износа.

В обоих случаях можно говорить о правомерности привлечения такого методологического инструментария, которым владеет триботехнология – научное направление, изучающее вопросы трения, износа, смазки во время контакта поверхностей во время их взаимного перемещения [3].

С точки зрения механизма достижения эффекта, описанные технологии отличаются друг от друга. Мы полагаем, что для управления свойствами материала необходимо иметь ясное представление об основных механизмах взаимосвязи структуры и свойств материала при работе колеса.

**2.1. Исследование технологии получения, структуры и свойств литейного чугуна – материала рабочих колес**

Чугун является своеобразным композиционным материалом, механические и эксплуатационные свойства которого зависят от характеристик металлической основы, а также от формы, размеров, количества и распределения графитовых включений. 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. Геометрические параметры чугунных отливок определяются качеством изготовления литейной формы и условиями её заливки [4].

#### **2.1.1. Состав чугуна, технология изготовления рабочего колеса и возможности ее усовершенствования.**

Рабочие колеса можно изготовить из легированных чугунов. Легированные чугуны разделяют на следующие группы [5]:

1. По химическому составу: марганцевые, алюминиевые, хромистые, кремнистые, никелевые.

Низколегированный чугун используется в качестве конструкционного материала, в связи с тем, что легирующие элементы увеличивают механические свойства. Характеристикой чугуна является перлитная или игольчатая структура.

Среднелегированный чугун имеет обычно мартенситную структуру и высокую износостойкость при повышенной и нормальной температуре.

2. По эксплуатационным условиям можно разделить на: износостойкие, коррозионностойкие, немагнитные, жаростойкие и жаропрочные высоколегированные чугуны. В большинстве случаев они обладают ферритной или аустенитной структурой. Применяются чугуны в качестве немагнитных, антикоррозионных, жаростойких или в качестве сплавов с особыми свойствами. В таблицах один и два представлены физико-механические свойства чугунов.

Таблица 6. Марки и физико-механические свойства легированных чугунов

| Марка чугуна       | Механические свойства |             |
|--------------------|-----------------------|-------------|
|                    | $\sigma_B$ , МПа      | НВ, МПа     |
| Хромистые чугуны   |                       |             |
| ЧХ3Т               | 200                   | 4400...5860 |
| ЧХ9Н5              | 350                   | 4900...6070 |
| ЧХ16М2             | 170                   | 4900...6070 |
| ЧХ28Д2             | 390                   | 3900...6070 |
| Никелевые чугуны   |                       |             |
| ЧН4Х2              | 200                   | 4600...6450 |
| Алюминиевые чугуны |                       |             |
| ЧЮХШ               | 390                   | 1830...3560 |
| ЧЮ6С5              | 120                   | 2360...2940 |
| ЧЮ7Х2              | 120                   | 2540...2940 |
| Марганцевые чугуны |                       |             |
| ЧГ6С3Ш             | 490                   | 2150...2540 |
| ЧГ7Х4              | 150                   | 4900...5860 |

$\sigma_B$  – предел прочности, НВ- твердость по Бринелю

Высокохромистые (до 34% хрома) и хромникелевые чугуны применяют для производства деталей, которые работают в условиях ударного абразивного изнашивания, при больших температурах.

Также за счет легирования чугуна, жаростойкость достигается кремнием (5...6% Si) и алюминием (1...2% Al). Свойства чугунов можно в значительной степени изменять соответствующей термической обработкой в нужном направлении.

Для изготовления рабочих колес может применяться чугун марки “Нирезист”,

Так, в [6] описано рабочее колесо, выполненное из чугуна аустенитного модифицированного типа “Нирезист”, соответствующего ТУ 26-06-1305-95. Химический состав чугуна (в мас.%): углерод 2,7-3,1, кремний 1,2-1,9, марганец 0,85-1,5, хром 0,7-1,5, никель 15-17, медь 6,1-8, алюминий 0,01-0,3, кальций 0,02-0,1, редкоземельные металлы 0,01-0,08, ниобий 0,005-0,02, барий 0,05-0,1, тантал 0,003-

0,01, фосфор 0,001-0,25, сера 0,001-0,03, магний 0,01-0,07, железо - остальное, механические свойства: твердость HB от 1200 до 1300.

Таким образом, для изготовления рабочих колес применяются высоколегированные многокомпонентные составы.

### *Особенности литевых технологий изготовления чугуна*

Разработка способа получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом – одно из перспективных направлений в производстве чугунных изделий. В этом чугуне отлично сочетаются высокие технологические и физико-механические свойства. В результате исследований и достаточного опыта на производстве установлено, что высокопрочный чугун (ВЧ) может удачно использоваться вместо ковкого и серого чугуна, а также легированной и углеродистой стали. Замена простого серого чугуна на высокопрочный, дает возможность существенно уменьшить массу отливок, за счет утоньшения их сечения, при этом увеличиваются показатели надежности при эксплуатации. Изменение формы графита в серых литейных чугунах улучшает их свойства и помогает существенно уменьшить массу деталей и увеличить коэффициент использования металла, но к сожалению технология получения высокопрочного чугуна достаточно сложна.

Самой сложной задачей является изготовление отливок из чугуна марок ВЧ60, ВЧ40 в соответствии с ГОСТ 7293-85. При этом, использование чугуна этих марок дает возможность по максимуму применить его хорошие физико-механические свойства.

Главная сложность состоит в том, что полученный металл не всегда удовлетворяет требованиям по механическим свойствам, особенно по параметрам вязкости и пластичности. Зачастую в заготовках бывает брак в виде "черных пятен", которые существенно уменьшают прочность детали. Также усадочные дефекты и мелкие газовые раковины на поверхности, являются свойственными для отливок из ВЧ. Существенной сложностью, для марки ВЧ60, является получение перлитной структуры, где феррит должен составлять не более 20%.

Значительный интерес представляет работа[7], посвященной созданию новых технологических процессов изготовления рабочих колес, работающих в условиях интенсивного абразивно – эрозионного износа [7]. На основании ранее выполненных исследований принимается, что чугун с графитом шаровидной формы в сравнении с пластинчатым графитом имеет существенно более высокие физико – механические характеристики[8].

В работе [7] решали задачу повышения эксплуатационных свойств рабочих колес за счет использования модернизированной технологии изготовления – изменения состава, структуры чугуна, а также технологических параметров на разных этапах общего цикла.

В настоящее время для изготовления рабочих органов насоса из аустенитного чугуна ЧН15Д7 (АЧ) с пластинчатым графитом (ПГ) ООО "Борец" использует многоместную песчаную форму, в которой одновременно получают 5 или 6 отливок.

Анализ опытной партии отливок с пластинчатым графитом, изготовленных ОАО ЦНИИТМАШ по технологии ООО "Борец", показал, что отливки имеют большое число дефектов усадочного и иного характера. Для преодоления проблемы высоких показателей брака (до 50%) потребовались значительные усилия, связанные с совершенствованием технологического процесса.

В результате выполненных исследований установлено, что замена пластинчатой на шаровидную форму позволяет не только в 2-3 раза увеличить прочность и пластичность аустенитного чугуна ЧН15Д7, но и существенно повысить его коррозионно – абразивную стойкость.

**Таким образом, показано, что методами модификации микроструктуры можно добиться существенного эффекта в улучшении характеристик рабочих колес. Вместе с тем, как будет показано ниже, наряду с описанным методом существуют и другие эффективные приемы улучшения характеристик рабочих колес.**

### **2.1.2. Исследование взаимосвязи структуры и свойств чугуна**



### Структура и состав высокопрочного графита.

Множественные наблюдения показали, что в процессе производства ВЧ бывает несколько характерных видов микроструктур графита: смешанный, вермикулярный, шаровидный. В процессе исследования установлено, что чугун со смешанной формой графита получается при содержании углерода в жидком чугуне менее 3,0-3,2% перед вводом магния и содержании магния 0,035%. Для стабильного получения графита с шаровидной формой требуется обеспечить содержание серы в металле более 0,02% [9,10], до того момента, когда будет введен магний. Для создания чугуна с шаровидной формой графита, требуется создать достаточный процент углерода, при этом шаровидный графит создается стабильно, когда содержание магния составляет 0,04-0,1%, а содержание углерода в металле уже высок.

Если между формой графита в ВЧ и его пластичностью и ударной вязкостью существует зависимость, то прочность и форма графита слабо коррелируют между собой, рис. 14.

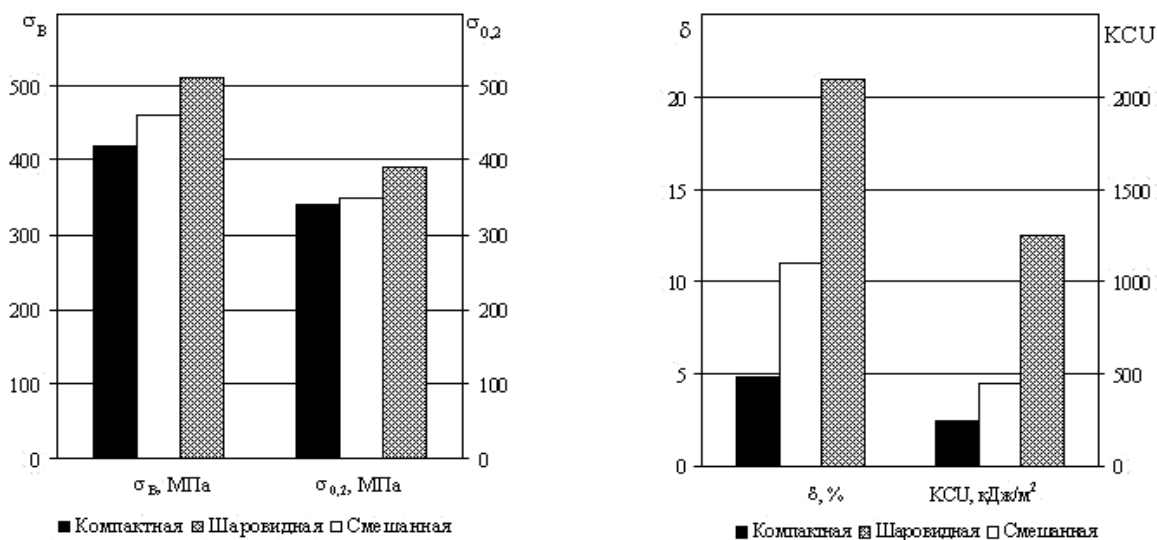
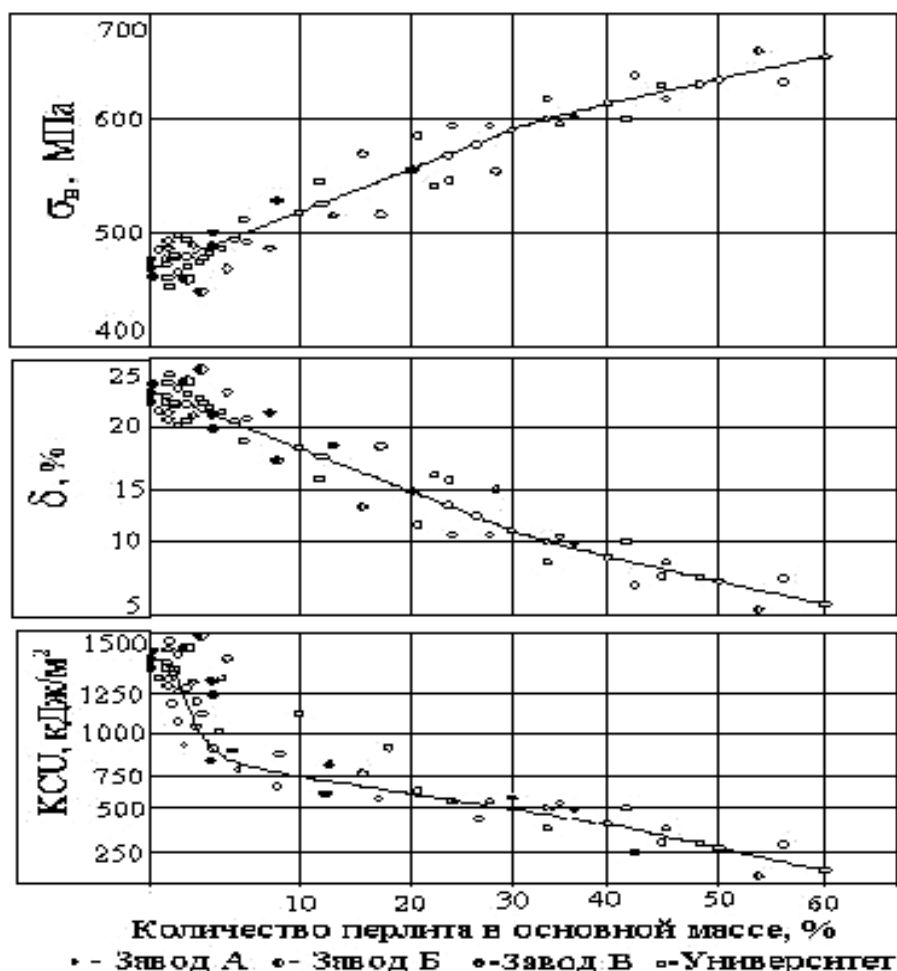


Рис. 14. Показатели прочности, пластичности и ударной вязкости для высокопрочного чугуна с различной формой графита  
а - показатели прочности; б – показатели пластичности и ударной вязкости.

В марке ВЧ60 феррита допустимо не больше 10% (рисунок 2), а в марке ВЧ40 (ферритный чугун) допускается 10-15% перлита.



Перлит  $\leq 10\%$

Рисунок 15. Зависимость перлита в металлической основе на мех. свойства высокопрочного чугуна.

В связи с тем, что не большое количество цементитаснижает ударную вязкость,то в ферритном и перлитном состояниях это недопустимо. Исследования влияния химического состава ВЧ на его механические свойства проводились на чугуне, выплавленном в лабораторных условиях в индукционной печи, а также в различных производственных агрегатах (вагранки, дуговые электропечи) на ряде заводов Урала[11]. Во всех случаях использовали данные только тех плавов, чугун которых имел полностью шаровидный графит и ферритную металлическую основу в литом состоянии или после отжига (не более 10% перлита).

Показано, что изменение содержания углерода от 2,4 до 3,9% не оказывает заметного влияния на все характеристики механических свойств ВЧ. Оно может выражаться лишь в том, что с понижением содержания углерода возрастает количество перлита, сохраняющегося после отжига. При этом вероятно также наличие структурного свободного цементита и графита нешаровидной формы.

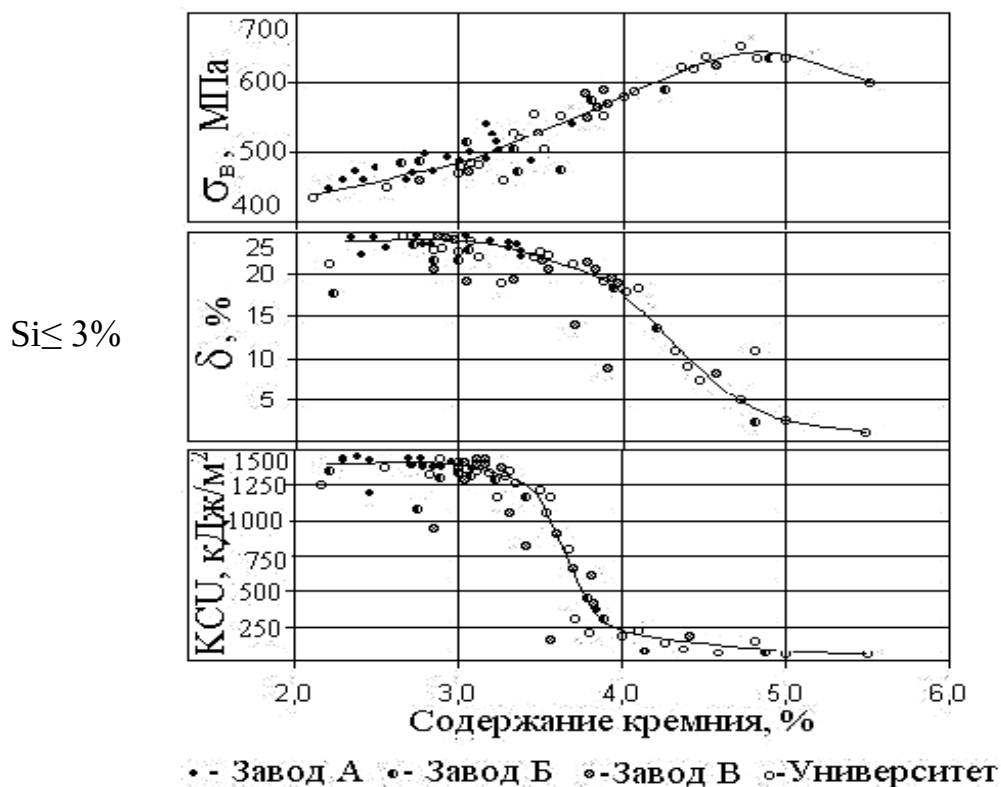


Рис.16. Зависимость механических свойств ВЧ от кремния.

С увеличением состава кремния 2-3% механические свойства высокопрочного чугуна особо не меняются (рисунок 16), но при следующем увеличении кремния заметно увеличивается предел прочности на растяжении и уменьшается относительное удлинение. Воздействие марганца идентично воздействию кремния. Существенное уменьшение относительного удлинения и сильное падение ударной вязкости, когда процент марганца выше 0,6 (рисунок 17). Так как присутствуют структурные свободные силициды магния, то идет процесс охрупчивания феррита, особенно для марки ВЧ40, в результате чего значения ударной вязкости существенно снижаются. Воздействие фосфора на уменьшение вязкости ВЧ и пластичности существенно заметно, когда его процент составляет более 0,08.

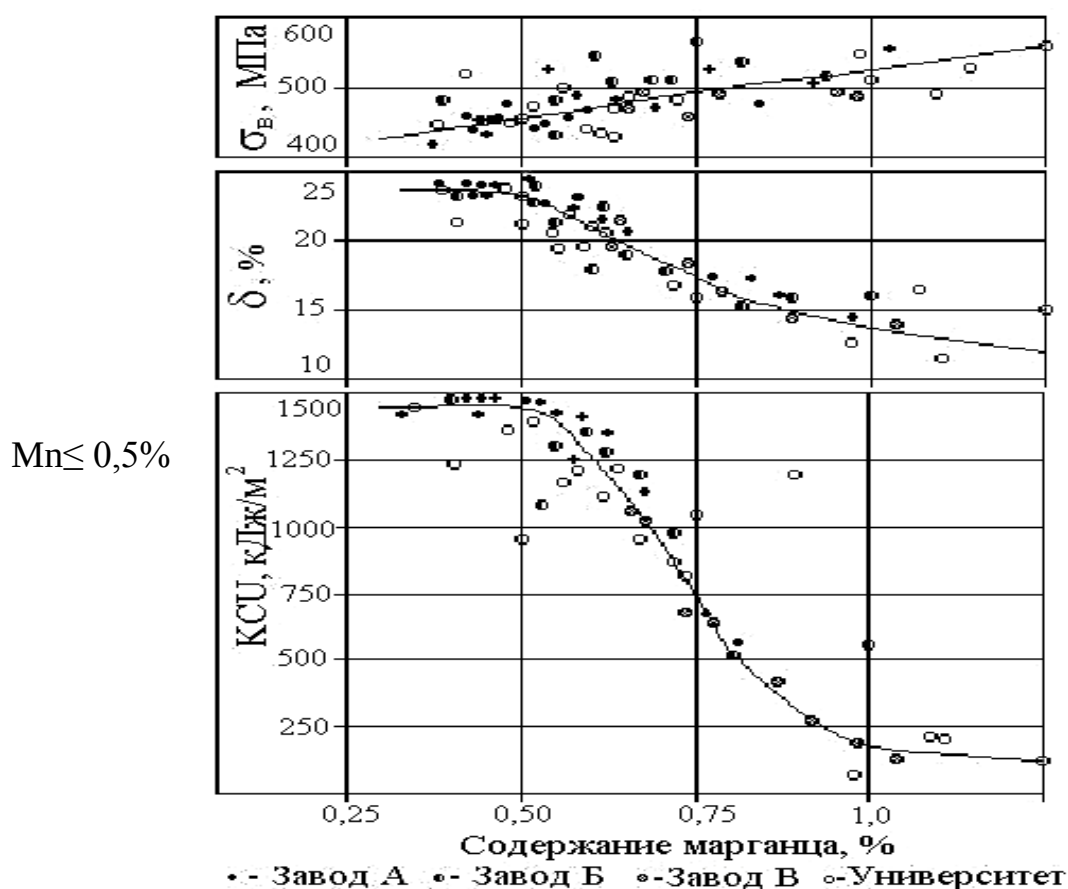


Рисунок 17. Зависимость механических свойств ВЧ от марганца.

Чугуны марок ВЧ60, ВЧ50, ВЧ45, ВЧ40 возможно изготовить в вагранках при корректном выборе модификаторов. В плавках использовались одинаковые шихтовые материалы, в связи с этим, получившийся металл был практически одинакового состава. Различие заключалось в том, что чугун нагревался в вагранке до  $1360^{\circ}\text{C}$ , а в печах индукционной и в электропечи до  $1450-1500^{\circ}\text{C}$ . Температура электропечного чугуна при заливке составила  $1340-1380^{\circ}\text{C}$ , а ваграночного чугуна  $1280-1300^{\circ}\text{C}$ . В таблице 7 приведены результаты механических испытаний полученного ВЧ (после отжига), которые описывают, что чугун, выплавленный в электропечах имеет более высокие значения относительного удлинения и ударной вязкости, что взаимосвязано с низким содержанием серы и увеличенной температурой при заливке. Другие параметры соответствуют стандартам ГОСТа в том числе и для ваграночного чугуна. Состав  $P \leq 10\%$ ,  $Si \leq 3\%$ ,  $Mn \leq 0,5\%$

При выплавке марок ВЧ40, ФЧ45, ВЧ50, ВЧ60 применялись стандартные чугуны ПЛ1 и ПЛ2, с уменьшенным составом марганца и фосфора.

Таблица 7. Механические свойства ВЧ

| №<br>п/п | Плавильный агрегат   | Механические свойства |              |                            |         |
|----------|----------------------|-----------------------|--------------|----------------------------|---------|
|          |                      | $\sigma_B$ , МПа      | $\delta$ , % | KCU,<br>кДж/м <sup>2</sup> | НВ, ГПа |
| 1        | Печь<br>индукционная | 470                   | 18           | 990                        | 170     |
| 2        | Печь<br>индукционная | 510                   | 16           | 980                        | 170     |
| 3        | Печь<br>индукционная | 550                   | 22,2         | 1240                       | 187     |
| 4        | Дуговая печь         | 535                   | 18,1         | 1150                       | 174     |
| 5        | Дуговая печь         | 523                   | 24,8         | 1050                       | 174     |
| 6        | Дуговая печь         | 544                   | 18,4         | 860                        | 174     |
| 7        | Дуговая печь         | 531                   | 19           | 950                        | 174     |
|          | Среднее              | 533,3                 | 20,7         | 1002,5                     | 174     |
| 8        | Вагранка             | 553                   | 6,9          | 450                        | 187     |
| 9        | Вагранка             | 540                   | 15,4         | 550                        | 170     |
| 10       | Вагранка             | 540                   | 18,5         | 430                        | 175     |
| 11       | Вагранка             | 507                   | 13,8         | 710                        | 192     |
| 12       | Вагранка             | 487                   | 20,6         | 670                        | 160     |

В результате опытных испытаний установлено, что при изготовлении отливок из чугуна марки ВЧ40, состав хрома в шихте не должен превышать 0,1%; для других типов ВЧ — состав остаточного хрома допускается не более 0,2%. Кремний, который вводился с применением модификаторов, практически целиком переходит в чугун и это нужно учитывать при расчетах шихты.

Для поддержания высокого уровня углерода, до момента его модифицирования, в чугуне, следует использовать стальной лом в шихте не выше 15-20%. При дальнейшей разливке расплава в формочки, необходимо приняты меры останавливающие создание "черных пятен", которые являются распространенным видом брака в отливках высокопрочного чугуна. После ввода магниевой лигатуры, большая часть углерода (0,2-0,8%) переходит в шлак.

На наш взгляд, в проблеме получения чугунов с требуемым уровнем свойств существует много нерешенных задач, и, прежде всего, это вопросы механизма прочности материала. Например, принято увязывать прочность чугуна с формой графита. Действительно, многочисленные экспериментальные данные указывают на существование такой корреляции, однако, объяснение этого факта в рамках более широкого взгляда отсутствует. Требуют выяснения такие аспекты, как, структура металлической основы материала с разной геометрией графита и легирующими добавками, фрактографические исследования и др.

**Таким образом, в высокопрочном чугуне механические свойства и структура находятся в сильной зависимости от химического состава. Вместе с тем, вопросы механизма прочности чугуна пока еще опираются преимущественно только на экспериментальные данные и разработаны недостаточно полно. Таким образом, для изготовления колес повышенной долговечности желательно использовать чугун состава представленного в таблице.**

## **2.2. Изучение механизмов износа деталей в условиях, близких к режимам эксплуатации рабочих колес**

На основе представлений о структуре и свойствах чугуна (п. 2.1.), можно переходить к изучению механизмов износа рабочих колес, что позволит обоснованно выбрать технологию их модификации.

### **2.2.1. Изучение износостойкости хромомарганцевых чугунов.**

В [12] рассмотрены вопросы эксплуатации литых деталей систем гидрозолоудаления (ГЗУ) тепловых электростанций, где наиболее быстро изнашиваются витки шнеков шлаковых транспортеров, колеса и корпуса багерных насосов, колена пульповых трубопроводов и др.

Выявлено, что сопротивление материала гидроабразивному износу напрямую зависит от состояния металла, его структуры, химического состава, способов термической обработки, которые способны придать высокую твердость, с одной стороны, и режимы эксплуатации, с другой.

Следует отметить, что износ в гидроабразивных средах представляется трудной и многозначной задачей контактирования металла детали с абразивом и средой, где имеет места ряд факторов:

- длительность эксплуатации;
- процент состава абразива в пластовой жидкости;
- форм, габаритов и твердости абразива;
- скоростных показателей в момент соударения с поверхностью;
- углов атаки частиц с поверхностью;

В связи с тем, что управлять данными процессами при производстве практически невозможно, единственным вариантом остается улучшение свойств материала и его характеристик.

Для решения данной задачи следует использовать теоретические и технологические наработки процессами управления формирования структуры и свойств металла в отливках из БЧ, определения пропорции основных химических элементов, модифицированием, микролегированием, изменениями режимов кристаллизации металла в отливках и режимами их термической обработки.

В качестве гидроабразивной среды (пульпы) использовали смесь кварцевого карьерного песка и воды в различных пропорциях, а в качестве эталона сравнения – образцы, изготовленные из хромоникелевого чугуна 280Х28Н2.

В промышленных условиях в качестве материала для изготовления литых деталей, работающих в условиях гидроабразивного износа, используют высоколегированный хромоникелевый чугун 280Х28Н2, который содержит в своем составе дорогой и дефицитный никель, и имеет плохую обрабатываемость на металлорежущих станках. Поэтому теоретический и практический интерес представляют исследования свойств и структуры других белых чугунов, например, хромомарганцевых.

Эксплуатационные и механические свойства белых износостойких чугунов [13, 14] зависят в первую очередь от карбидной фазы. При большом количестве твердых и хрупких карбидных фаз наблюдаются низкие пластические свойства чугунов,

однако при условии прочной связи их с матрицей сплава значительно повышается сопротивление металла абразивному воздействию.

Исследованиями влияния хрома на износостойкость белого чугуна с содержанием около 4% марганца установлено, что наивысшую (на 20...25% выше, чем чугуна 280Х28Н2) износостойкость имеет чугун с содержанием 17...22% хрома (рис.5). 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 и уже при содержании марганца около 9% она станет меньшей, чем сплава 280Х28Н2.

По результатам исследований [12] предложен базовый хромомарганцевый чугун с содержанием 18...20% хрома и 3,8...4,5% марганца, которому присвоена марка 290Х19Г4.

Повысить износостойкость БЧ возможно при помощи дополнительного микролегирования и модифицирования.

При исследовании влияния сурьмы на характеристики 290Х19Г4 (чугун) в пределах 0-1,0% (по присадке) выявлено, что незначительные присадки (не более 0,15%) оказывают положительное воздействие на увеличение износостойкости чугуна в пределах 15-20% вследствие ее воздействия как на эвтектическое превращение, так и на кристаллизацию аустенита.



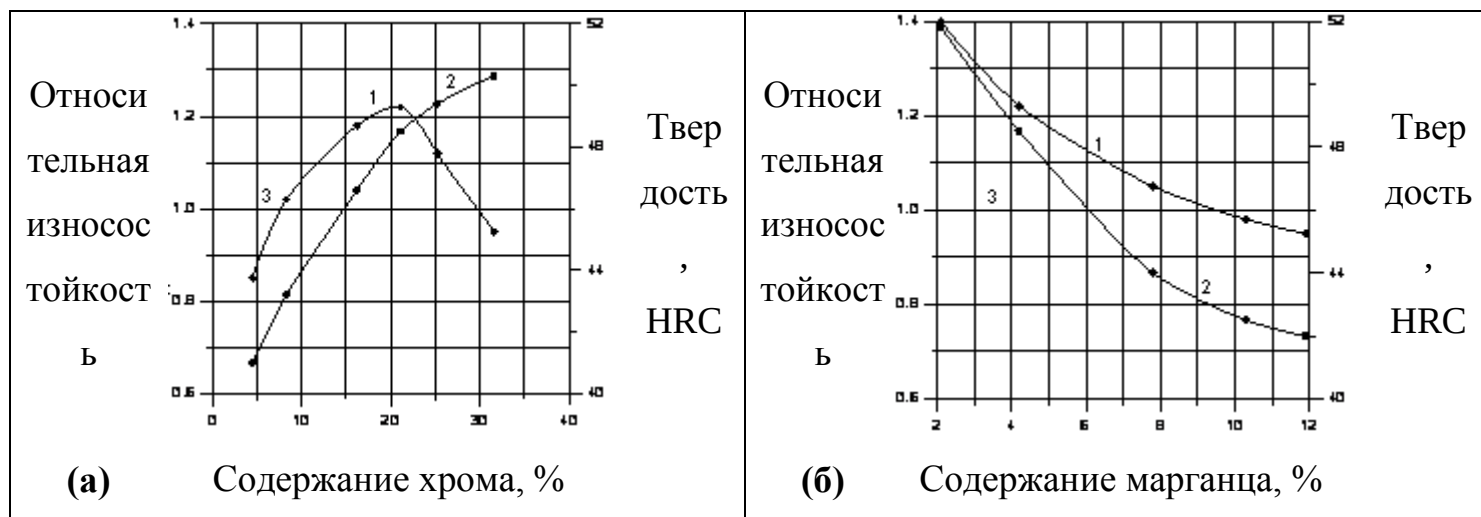


Рисунок 18. Изменение твердости и износостойкости белых чугунов в зависимости от содержания в них хрома (а) и марганца (б): 1 – относительная износостойкость; 2 – твердость; 3 – эталон 280Х28Н2

Сурьма увеличивает количество эвтектики и изменяет ее, при этом сурьмасмещает эвтектическую точку в сторону уменьшения концентрации углерода.

В дальнейшем большее количество сурьмы сильно уменьшает износостойкость чугуна, т.к. образуется не мелкодисперсная эвтектика, а сплошной свободный структурно цементит, а он в свою очередь уменьшает связь с матрицей сплава и выкрашивается при воздействии абразивных частиц.

Таким образом, для повышения износостойкости хромомарганцевого чугуна, имеет место быть дополнительная микролегирование сурьмой в пропорции 0,1-0,15% (по присадке).

В ходе исследования влияния бора на характеристики хромомарганцевого чугуна в пределах состава 0-0,1% (по присадке), установлено, что при дополнительной обработке чугуна бором сильно возрастает износостойкость и увеличивается твердость материала.

Бор существенно влияет на процессы кристаллизации чугуна, с положительной стороны, в качестве активного поверхностного элемента, при этом происходит измельчение. Также бор меняет границы зерен, и пограничные слои, что исключительно с лучшей точки зрения влияет на свойства чугуна.

Микролегирование чугуна бором повышает его технологические и эксплуатационные свойства и этим снижает содержание в чугуне хрома, марганца, никеля и других элементов.

Однако исследования показали, что к обработке чугуна бором необходимо подходить очень осторожно, поскольку уже концентрации 0,03% возможна повышенная хрупкость чугуна, что при комнатной температуре возможно получить излом, но при этом износостойкость не меняется.

**На основе литературных данных установлено, что износостойкость самых легированных чугунов можно повысить дополнительным микролегированием и модифицированием. Использование чугунов, являющихся литейным материалом должно идти в направлении изменения их структуры с получением округлой формы составляющих структуру.**

#### **2.2.2. Изучение износостойкости рабочих колес с повышенными характеристиками.**

Комплексное исследование параметров рабочих колес с повышенными характеристиками выполнено в [7]. В указанной работе решали задачу повышения эксплуатационных свойств рабочих колес за счет использования модернизированной технологии изготовления – изменения состава, структуры чугуна, а также технологических параметров на разных этапах общего цикла.

В число испытаний входили:

- коррозионная стойкость в водном растворе хлоридов;
- износостойкость в паре трения “нирезист – карбонит” определяли с помощью машины “УТМ- 1”;
- износостойкость в паре трения “нирезист – нирезист ” определяли на стенде “СТИЗ - 1”
- относительную износостойкость при гидроабразивном износе определяли на стенде “СТИГ - 1” при давлении воды на входе в распылительную головку 4,5 МПа, расходе воды 0,18–0,19 л/с и общем расходе абразива во время испытаний (82 мин.) 5000 г.;

- склонность к солеотложению в растворе;
- ростоустойчивость.

Таблица 8. Результаты комплексных испытаний рабочих колес, изготовленных из чугуна с пластинчатым (ПГ) и шаровидным графитом (ШГ)

| Марка чугуна  | Скорость коррозии, мм/год  |                | Интенсивность солеотложения, г/ч | Ростоустойчивость при температуре – 60°С, % | Износостойкость в паре трения с карбоном, г/ч | Износостойкость в паре из одного материала, мкм | Несущая способность, Н | Относительная гидроабразивная износостойкость |
|---------------|----------------------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------------------|
|               | в водном растворе хлоридов | в сероводороде |                                  |                                             |                                               |                                                 |                        |                                               |
| ЧН15Д7 с ПГ   | 0.0475                     | 4.483          | 0.051                            | 0                                           | 3.3                                           | 2.18                                            | 100                    | 1.00                                          |
| ЧН15Д7 с ШГ   | 0.0232                     | 1.358          | 0.048                            | 0                                           | 2.4                                           | 1.13                                            | 900                    | 1.41                                          |
| ЧН10Д7Г4 с ШГ | 0.0305                     | 1.840          | 0.050                            | 0                                           | 2.6                                           | 1.25                                            | 840                    | 1.38                                          |

Из сопоставления результатов видно, что аустенидный чугун по сравнению с пластинчатым шаровидным графитом имеет более высокий уровень относительной износостойкости при гидроабразивном износе, а также ряд других преимуществ.

### 2.2.3. Модифицирование поверхности рабочих колес как способ управления служебными свойствами.

По мере развития процесса износа, структура поверхности претерпевает известные трансформации, становясь более развитой и открытой, что ведет к увеличению трения, и, соответственно, износа. Поверхностный слой металлов ни что другое, как атомная плоскость, где не полностью завершена кристаллическая решетка, что может привести к увеличенной сорбционной активности поверхностного слоя.

В реальности на поверхности имеется адсорбированный слой механической пыли и различных молекул (кислород, смазочные материалы, молекулы воды, и т. д.), состав которых связан со средой обитания (рисунок 19). Также, имеет место прямых химических взаимодействий поверхности и активных элементов среды. Химическое взаимодействие поверхности материала с жидкостью и созданием оксидной пленки, является самым распространенным видом.

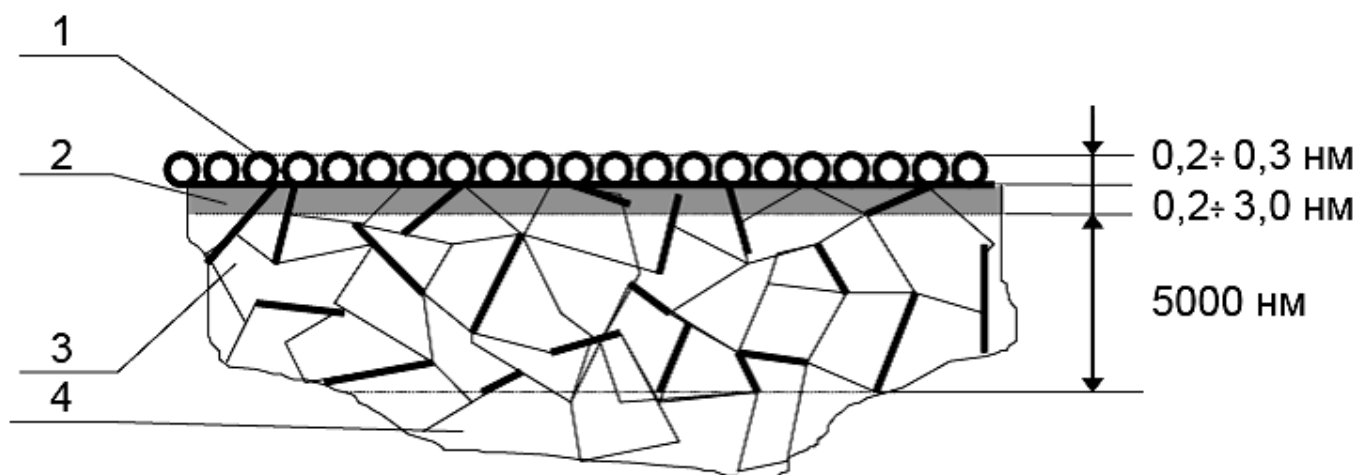


Рисунок 19. Структура поверхностного слоя:

- 1 – адсорбированный слой частиц среды; 2 – окислы, нитриды металла;  
3 – слой сильно деформированных зерен

Среди физико–химических факторов, способных играть значительную роль в гидроабразивном износе, отмечается эффект Ребиндера (внешний и внутренний), который заключается в адсорбционном уменьшении прочности металла за счет уменьшения свободной энергии и расклинивающим действии поверхностно-активных веществ (ПАВ) при их попадании в полость поверхностных трещин [15, 16]. Образующиеся на поверхности слои пленки, могут проявлять экранирующий эффект для подвижных дислокаций, с выходом их наружу; в следствие чего увеличивается предел прочности и текучести, также усталостная долговечность подповерхностного слоя.

На основе анализа литературных данных показано, что в высокопрочном чугуने механические свойства и структура находятся в сильной зависимости от химического состава, а также, что аустенитный чугун по сравнению с пластинчатым шаровидный графит имеет более высокий уровень относительной износостойкости при гидроабразивном износе.

Сильная зависимость износостойкости при гидроабразивном износе от структурных параметров может быть связана с тем, что износ происходит по структурным дефектам – порам, границам зерен и др. несовершенствам. Это типичная картина для разрушения поликристаллических твердых тел, к которым относятся все материалы с гетерогенной структурой.

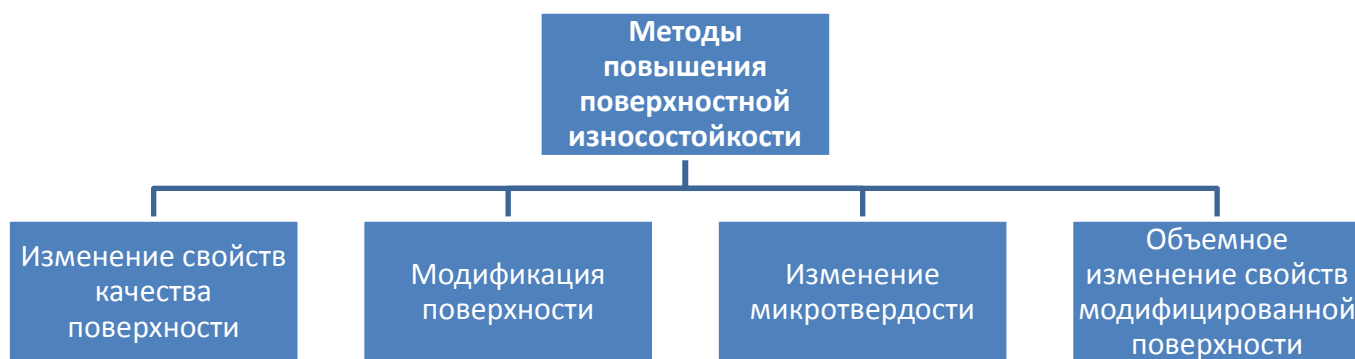
Идея защиты поверхности детали в случае гидроабразивного износа на первый взгляд кажется очевидной, однако при ее реализации возникает проблема выбора оптимального решения.

Можно отметить, что в число применяемых методов модернизации поверхности деталей входят такие способы, как импульсная лазерная обработка [4], высокоскоростным нагревом [18] и др. методами.

### **2.3. Анализ методов поверхностного упрочнения материалов с целью выбора оптимального решения для рабочих колес**

В триботехнологии, [5] в качестве способа повышения качества несущего слоя указывается на такие возможности как:

- образование слоя или пленки из высокопрочного, коррозионно- или износостойкого материала из материала-основы;
- увеличение опорной длины профиля поверхности механическими, электрофизическими методами, алмазно-абразивной обработкой и ее разновидностями; электрохимическим полированием; выглаживанием и обкатыванием; сатинированием в процессе обработки вращающимися металлическими щетками; уменьшение или регуляризация значений шероховатости,
- упрочнение деформационное, получается путем обработки поверхностным пластическим деформированием или путем воздействия на поверхность материала основного материала концентрированными потоками энергии или
- изменения химического состава поверхности основного материала в результате его перенасыщения атомами материала-упрочнителя – поверхностным легированием;
- термо-упрочнение в следствии локального термического воздействия на слой поверхности основного материала;
- с помощью комбинирования изложенных методов.



Методы упрочнения поверхности материала или более широкой модернизации поверхности исключительно разнообразны по своей природе, и многочисленны.

В данном исследовании мы рассмотрим лишь те из них, которые применяются для управления показателями износостойкости в чугунах и сталях.

Методы повышения износостойкости материалов условно можно разделить на пять групп:

- 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 структур по всему объему металла - объемная модификация структуры.

К первой группе с образованием твердого слоя на поверхности относят такие способы упрочнения как:

- а) осаждение с использованием химических процессов из жидкой фазы (оксидирование, сульфидирование, фосфатирование и т.д.);
- б) электролитическое осаждение (хромирование, никелирование, борирование и др.);
- в) формирование твердых осадков из газовой фазы (по механизму пар- жидкость – твердое тело, термическое испарение и конденсация и др.);

г) напыление износостойких соединений (плазменное, детонационное, электродуговое и лазерное напыление).

К способам осаждения химической реакцией из жидкой фазы относят образование фосфатного, оксидного или ионного химического не металлического покрытия на поверхности металлических изделий. Применяют при обработке изделий из стали, алюминия, меди, магния и других металлов для повышения коррозионной стойкости, в декоративных целях или как грунтовку перед окраской, в частности как способ повышения коррозионной стойкости высокопрочных болтов, автомобильных деталей и др. Этот способ характеризуется широким спектром возможностей в плане выбора исходных ингредиентов, а также составов получаемых покрытий. Однако, получение качественного осадка во многих случаях представляет собой весьма сложную проблему, и, кроме того, бывает трудно обеспечить хороший уровень адгезии покрытия к подложке. Для решения задачи модернизации поверхности рабочего колеса этот метод может рассматриваться как перспективный в случае, если будут найдены способы преодоления указанных проблем.

К способам электролитического осаждения относят никелирование, хромирование, заключающиеся в осаждении металла с образованием покрытия на поверхности изделия при пропускании тока между анодом (пластиной из металла, наносимого на изделие) и катодом (обрабатываемым изделием).

К недостаткам способа следует отнести длительность и сложность метода, а также хрупкость и недостаточную износостойкость, полученного осадка, что ограничивает области возможного применения этого метода.

К способам осаждения твердых осадков из паров относят процессы по механизму пар- жидкость - твердое тело, термическое испарение тугоплавких соединений с последующей конденсацией, электрохимическое испарение и др. методы.

По механизму пар- жидкость - твердое тело могут быть получены как поликристаллические, так и монокристаллические материалы. Это высокоорганизованные совершенные структуры, однако, технологическое

оформление этих процессов дорогое, сами процессы медленные, и для целей настоящей работы на данное время перспективы не представляют.

Напыление - один из популярных методов нанесения покрытий на различные инструменты и детали. Существуют следующие виды напыления: дуговая металлизация, детонационное, плазменное, газопламенное напыление, напыление и электроимпульсное нанесение покрытий.

Газопламенное напыление представляет достаточно простую технологию, при этом затраты на оборудование и затраты на эксплуатацию не велики. Благодаря этому данный метод имеет широкое применение на практике.

К недостаткам способа можно отнести достаточно длительное воздействие высокой температуры на обрабатываемый материал, контакт с кислородом. Это вызывает возникновение большой зоны термического влияния и возможные процессы обезуглероживания.

Применение методов детонационного напыления, дуговой металлизации, плазменного напыления [19,20] позволяет создавать на поверхности инструмента тонкие износостойкие слои, повышающие прочность и стойкость, но в процессе эксплуатации возможно отслоение этих покрытий или выкрашивание инструмента из-за его высокой поверхностной твердости. Кроме этого, как правило, для осуществления этих методов требуется сложная дорогостоящая аппаратура, что часто затрудняет процесс упрочнения металла этими методами.

В настоящее время достаточно широкое применение для упрочнения поверхности находит нанесение электроимпульсных покрытий.

Метод нанесения электроимпульсных покрытий основан на импульсном разряде конденсатора через прутки напыляемого металла [21,22]. Во время этого происходит взрывное плавление прутка с осаждением мелких расплавленных элементов металла на поверхность детали.

Оригинальность электроимпульсного метода покрытия деталей связано с очень большими габаритами частиц в мелкораспыленном состоянии напыляемого материала. При распылении, где температура приближена к точке кипения металла прутка, все частицы находятся в мелкораспыленном состоянии, при этом нагрев



происходит равномерно. В момент соударения с основной поверхностью скорость движения частиц составляет сотни метров в секунду. Перемещение частиц к поверхности по направлению к основному материалу осуществляется за счет резкого расширения газа во время взрыва и вытеснения воздуха из зоны взрыва. Данный факт практически исключает окисление частиц, а значит обеспечивает получение плотной поверхности с высокой прочностью сцепления с основным материалом.

Недостатком напыления методом электроимпульсной обработки является то, что его использование ограничено электропроводными материалами. Помимо этого, данный метод не всегда пригоден для получения покрытий большой толщины.

К методам с изменением химического состава и структуры поверхностного слоя относят методы диффузионного насыщения: поверхности металла атомами металлов и неметаллов. Как правило, такое насыщение проводят методами химико-термической обработки, которая не требует сложного дорогостоящего оборудования и достаточно проста в применении. Кроме этого, химико-термическая обработка позволяет в ряде случаев получить комплекс свойств необходимых для повышения срока службы инструмента в конкретных условиях эксплуатации. К методу диффузионного насыщения относят нитрооксидирование, азотирование, хромирование, цементацию, цианирование, борирование и т.д. [23].

К этой же группе (с изменением структуры поверхностного слоя) относятся методы:

а) лазерная и плазменная закалка;

б) электрофизическая обработка (электроимпульсная обработка, электроконтактная обработка, электроэрозионная обработка, ультразвуковая обработка);

в) механическая обработка (упрочнение вибрацией, фрикционно-упрочняющая обработка, дробеструйная обработка, обработка взрывом, термомеханическая обработка, прокатывание, волочение, редуцирование и т.д.).

Первые два метода позволяют создавать на поверхности металла тонкие износостойкие слои повышенной прочности. После этих процессов не нужно применять окончательную механическую обработку, что даёт возможность

довольствоваться слоями небольшой толщины. Недостатком такого способа также является использование дорогостоящей аппаратуры.

В методе обработки в магнитном поле – электроферромагнитная обработка, обработка в импульсном магнитном поле [22]. Метод можно применять как для повышения стойкости режущего инструмента – резцов, сверел, плашек, так и для матриц и пуансонов разделительных штампов холодной листовой штамповки. Сложность заключается в расчёте значения остаточной индукции: и напряженности, необходимых для намагничивания инструмента. Параметры процесса можно установить только экспериментально.

Группа методов с изменением шероховатости поверхностного слоя включает в себя следующие методы:

- а) электрохимическое полирование (окунание в ванну в струе электролита);
- б) обработка резанием (шлифование, суперфиниширование);
- в) пластическое деформирование (накатка, раскатка).

Эти методы в основном используются для режущего инструмента, применяемого на станках – резцы, свёрла, метчики, плашки и т.д. Остаточные напряжения сжатия, полученные режущим инструментом в результате обкатки, затрудняют отрыв частиц инструмента и уменьшает износ. Однако существует возможность образования шлифовочных трещин на поверхности инструмента при неправильно выбранном режиме обработки. Стойкость инструмента увеличивается в 1,3 – 2 раза.

К группе методов с изменением структур по всему объёму металла относятся:

- а) термическая обработка при положительных температурах (закалка светлая, обычная, несквозная, сквозная, изотермическая, с самоотпуском, с непрерывным охлаждением ступенчатая, отпуск низкий, высокий);
- б) криогенная обработка (закалка с обработкой холодом с температуры закалки или охлаждение с нормальной температуры);
- в) магнито-электроимпульсные методы.

Термообработка при положительных температурах изменяет прочностные характеристики по всему сечению детали, что не всегда приемлемо. Криогенные

методы есть смысл использовать для сталей с повышенным содержанием остаточного аустенита.

Систематизация методов модификации поверхности не имеет строгих и однозначных критериев, и некоторые методы могут быть отнесены сразу к нескольким группам.

Из общего массива методов выбор тех, что могут быть использованы для достижения целей, поставленных в настоящей работе, целесообразно выполнить, исходя как из характеристик методов, так и из анализа опыта практической реализации.

Наряду с перечисленными выше методами, существуют технологии обработки поверхности, которые приобретают особый смысл с точки зрения трибологии, как науки, изучающей износ, трение, смазку в процессе взаимодействия контактирующих поверхностей при их взаимном перемещении. Укажем на некоторые из них.

#### *Процесс микродугового оксидирования.*

Упрочнение данным методом является результатом электроплазмо-химического преобразования поверхностного слоя в многофазную оксидную керамику, которая обладает хорошей теплостойкостью и износостойкостью.

Наиболее производительным, из всего числа технологий формирования оксидного слоя, является процесс микродугового оксидирования. Данный процесс позволяет создать на поверхности детали микродуговые разряды, которые приводят к разложению электролита, высвобождению из него кислорода, который, диффузионно внедряясь в поверхностный слой, приводит к окислению металла. Но этот метод для нашего случая не применяется.

#### *Применение антикоррозионного полимерного покрытия с применением порошковой металлургии.*

Для коррозионной стойкости различных металлоконструкций используют различные антикоррозионные покрытия, в том числе – полимерные. Полимерные покрытия должны соответствовать следующим основным требованиям: достаточно хорошей адгезией покрытий с основой; коррозионной стойкостью покрытий,

отсутствием пористости, механической прочностью. Процесс нанесения покрытий должен быть технологичен. Покрытия на основе термопластов обладают большими возможностями антикоррозионной защиты химического оборудования, которое эксплуатируется в условиях высоких давлений и повышенных температур, а также воздействия агрессивных сред. К этой группе относятся наиболее химически стойкие и наименее диффузионнопроницаемые полимеры. Эти материалы также обладают и всеми основными свойствами защитных покрытий.

#### *Финишная(безобразивная)антифрикционная обработка.*

Сущность данного процесса ФАБО заключается в том, что стальные и чугунные детали после окончательной традиционной обработки (хонингование, полирование, шлифование, резание и др.) покрываются тончайшим слоем (1...5 мкм) меди, бронзы или латуни. Покрытие наносится путем трения прутка (инструмента) латуни, меди или бронзы о поверхность детали, тем самым смазывается поверхность трения путем технологической жидкости. Во процессе трения состав прутка переносится на стальную (или чугунную) поверхность деталей. Такие переносы материала рабочего инструмента на детали происходит сплошным слоем, который состоит из мельчайших частиц, которые хорошо сцеплены и с чугунной или стальной поверхностью, а так же между собой. Данный метод можно применять для деталей изготавливаемых с помощью литья. Обязательным требованием является полное прилегание поверхности инструмента с поверхностью деталей.

#### *Графитирование поверхности.*

Одним из наиболее популярных, среди твердых смазочных материалов, с коэффициентом трения, который составляет 0,1...0,15 является – графит.

Структура графита состоит из тончайших пластин, которые легко скользят друг по другу, и при этом обладают высоким коэффициентом сопротивления сжатию. Хорошие показатели антифрикционных свойств графита заключаются в его пластинчатом строении (слоистом). В сравнении со связями между атомами пластин, связь между пластинами графита слабее. Благодаря наличию влажной адсорбционной пленки, находящейся на поверхности слоев графит обладает хорошими смазочными свойствами.

### *Технология эпиламинирования.*

Эпиламинирование – это многокомпонентная система, которая включаетв себя различныефункциональные добавки ифторорганические поверхностно-активные вещества (ПАВ) в различных растворителях.

Во время нанесенияна поверхность деталей составаПАВ (эпиламинирование) образуется тончайший слой молекул, который позволяет ей придать антиадгезионные, антифрикционные, гидрофобные и другие нужные свойства, такие, как: - уменьшение поверхностной энергии для металлов с 4000 до 3 мН/м), что приводит к значительномууменьшению коэффициента трения и в результате этого – к увеличению износостойкости сопряженных деталей;-уменьшение поверхностной энергии материала (от 1000 до 10000 раз);

- в результатехорошей проникающей способности, ПАВ закупоривают все поры и микротрещины, дегазирует их и тем самым охрупчивание деталей; микротрещины не имеют возможности сосредотачивать напряжения и в результате перестают быть основным центром разрушений;

- пленки ПАВ имеют высокую стойкость к температурам и не меняют своих эксплуатационных характеристик в интервале температур от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+450^{\circ}\text{C}$  и в результате чего могутприменяться в авиационной и космической технике, а также к давлению (мах нагрузка до  $3000\text{ мН/мм}^2$ ), воздействию химических веществ и радиации.

- эпиламинирование обладает высокими свойствамизащиты от влияния различных агрессивных сред;

*Формирование износостойких покрытий методом механотермической обработки.*

Главным недостатком является то, что в результате наплавки износостойких слоев на поверхности деталиобразуется существенное количество сварочных дефектов на нанесенном покрытии, присутствие основного материала в наплавляемом слое и т.к. В процесс механо-термического формирования

поверхности, наносимый состав кристаллизуется в стесненных условиях, поскольку воздействует сжимающее механическое усилие (нагрузка). Изготавливаемый в данном случае наносимый слой материала не содержит каких-либо пустот, а сам металл практически не подплавляется, поскольку содержание его в износостойком составе минимально.

Из всех перечисленных методов по совокупным качествам (простота, надежность, распространенность и др.) мы выделяем жидкофазные технологии и химико-термическую обработку.

## **2.4. Отработка технологии поверхностного упрочнения рабочих колес**

Жидкофазные методы нанесения покрытий представляют, в плане достижения целей настоящей работы, значительный интерес.

В качестве упрочняющего элемента следует исполнить виды работ [24- 27], но необходимо разработать технологический процесс борирования при литье.

### **2.4.1. Борирование по методу химико-термической обработки (ХТО)**

Борирование [28] — химико-термическая обработка, которая насыщает поверхностный слой стали бором при нагреве в соответствующей среде (упрочнение поверхностей). Тысячные доли бора увеличивают износостойкость стали в 2 раза. Борирование чаще всего проводят при электролизе расплавленной буры ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ). Изделие служит катодом. Температура насыщения 930—950° С, выдержка 2 — 6 часов.

Метод ХТО - один из эффективен и широко применяется в промышленности для повышения показателей долговечности и надежности основных узлов деталей машин, а также технологической оснастки и инструмента [28].

Под методом ХТО понимается нагрев детали с последующей их выдержкой при высоких температурах и химически активных средах (твердых, жидких или газообразных), после чего изменяется свойство поверхностных слоев, химический состав, структура.

В сравнении с другими методами поверхностной обработки металлов (дробеструйный наклеп, накатка роликами, индукционная, газопламенная и

электролитная закалка, лазерная обработка и т.д.), ХТО имеет ряд существенных преимуществ (хотя часто уступает им в производительности):

1. Методом ХТО возможно обрабатывать детали различной геометрии и размеров. При прочих методах поверхностного упрочнения, геометрические параметры играют большое значение (пример: накатка роликами или закалка ТВЧ).

2. Во время ХТО, в сравнении с другими методами обработки, достигается большая разница в свойствах поверхностного слоя и сердцевины. Это связано с тем, что во время термических и механических процессов упрочнения меняется исключительно структура поверхностных слоев, а при ХТО помимо этого меняется еще и их химический состав.

3. Главная сложность, возникающая в большинстве методов термических поверхностных упрочнений - это перегрев поверхностей, при ХТО отсутствует, или же может быть устранена последующей термообработкой.

Высокая износостойкость - это ключевое свойство, ради которого применяют метод борирования сплавов или же металлов. Износостойкость борированных сталей марки-45, в режиме сухого трения-скольжения выше в 4-6 раз износостойкости цементированных; в 3-8 раз цианированных; 1,5-3 раза нитро-цементированных; в 4 раза закаленной низкоотпущенной стали 45; в 2 раза хромо-силицированных; [29].

Нужные свойства поверхностных слоев могут формироваться как в процессе ХТО (хромирование, азотирование, борирование и др.), так и в случае последующей термообработки (цементации, нитро-цементации).

На сегодняшний день имеется не малый опыт промышленного применения борирования, который увеличивает долговечность: пальцев и втулок гусениц трактора и других гусеничных машин в 5-17 раз; втулок буровых и грязевых насосов в 3-4 раза; пальцев черпаковой цепи земснаряда - в 6-7 раз; деталей металлургического оборудования - в 3-5 раз; ножей для холодной резки металлов - в 3-4 раза; деталей пресс-форм литья под давлением алюминиевых сплавов - в 2-15 раз; дисков трубы турбобура - 4-5 раз; матриц и пуансонов штампов холодной штамповки - в 2-13 раз; деталей штампов горячей штамповки - в 1,5-3 раза; деталей

пресс-форм фарфорофаянсового производства – в 2-3 раза; деталей технологической оснастки – в 1,5-5 раз и т.д. [29].

Насыщение поверхностисталей и сплавов методом диффузии, в основном проводят при высокой температуре изотермической или изотермически-ступенчатой выдержке с последующей перекристаллизацией стали в состояние аустенита. Все это приводит к перегреву, структурные и механические свойства, за исключением износостойкости и твердости ухудшаются. Основным минусом процесса традиционной ХТО являются также: высокая энергоёмкость и высокая продолжительность.

Все недостатки устранимы в режиме циклического изменения температуры - термоциклирования (ТЦО), при диффузионном насыщении поверхности сплава [30].

Минусом этого метода является то, что увеличение прочности не связано с требуемым уровнем пластичности стали, помимо этого приведенный способ трудоемок и долгий.

Установлено, что процесс диффузии по границам зерен выступает в роли главного механизма карбоборирования, за исключением поверхностного слоя, там определяющим параметром выступает реакционная диффузия.

Много-компонентное насыщение применяется крайне редко, не зависимо от того, что диффузионные слои могут сочетать различные свойства однокомпонентных слоев, и как следствие, дают возможность увеличить эксплуатационные параметры применяемого инструмента и деталей машин.

Большое применение на производстве и в промышленности получили другие методы однокомпонентного диффузионного насыщения металлами и неметаллами (цементация, азотирование, хромирование) или же такие как борирование.



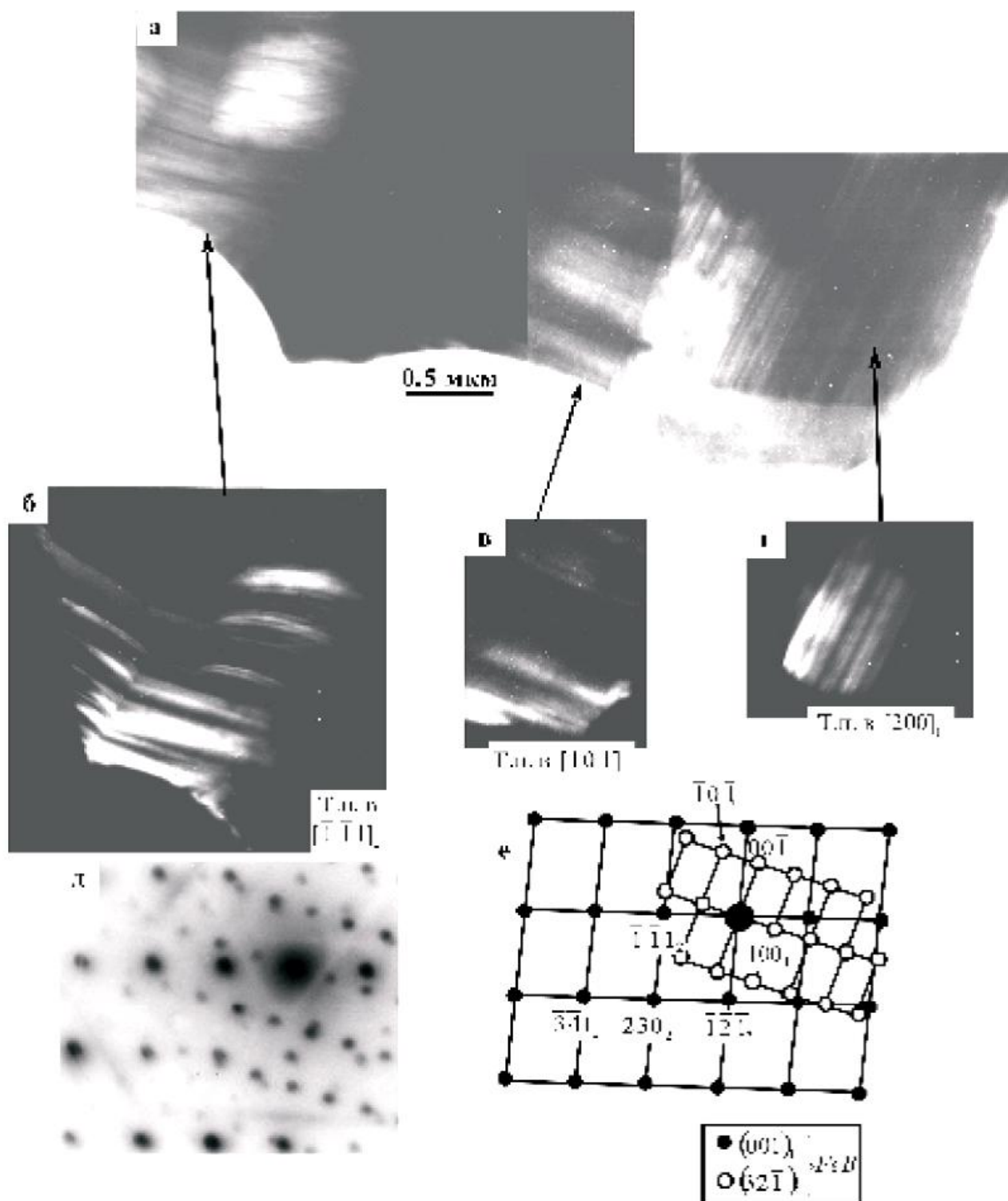


Рисунок 20. Тонкая структура на примере борированной стали 45.

Изображение получено на поверхности образца (слой I): а – светлопольное изображение; д – микродифракционная картина; е – её индцированная схема (содержит рефlekсы, принадлежащие плоскостям борида FeB); б-г – темнопольные изображения, полученные в указанных рефlekсах;

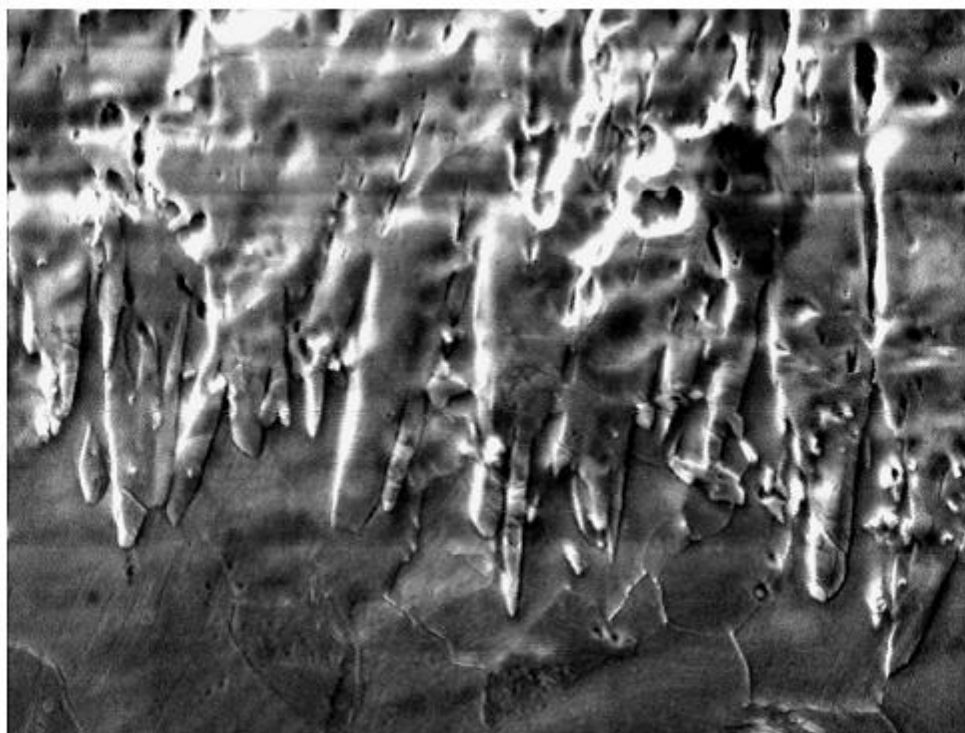


Рисунок 21. Структура борированного слоя сталь 45, полученная методом РЭМ, – столбчатые кристаллы борида FeB

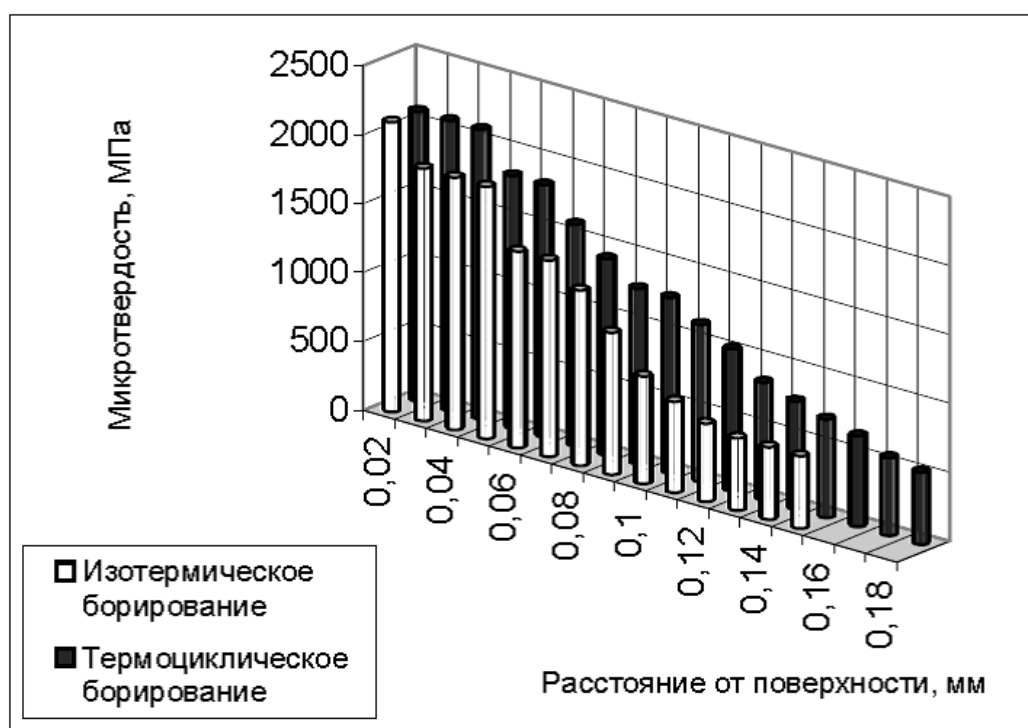


Рисунок 22. Литая сталь марки 5ХНМ. Распределение микротвердости борированного слоя

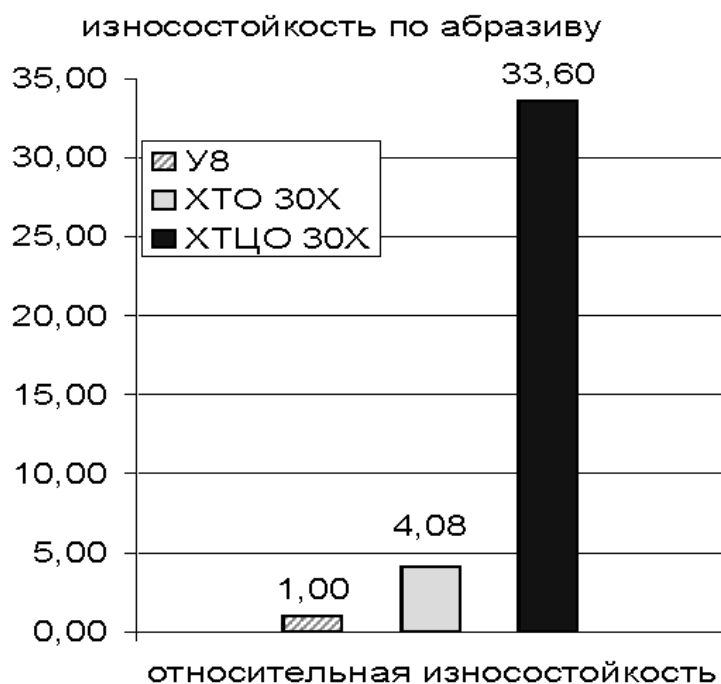


Рисунок 23. Относительная износостойкость боро-хромированной по различным (ХТО и ХТЦО) режимам стали 30Х в сравнении с закаленной сталью У8А

Получение однородных по физико-химическим свойствам слоев является положительным моментом химико термо-циклической обработки(ХТЦО), в результате это повышает их износостойкость (рис.23). В результате более меньшая их твердость компенсируется более высокой пластичностью и как следствие, более высоким показателем к ударным нагрузкам.

С учетом данных исследования структуры борированного слоя (рис.20,21) и распределения микротвердости борированного слоя, рис. 9, составлена модель упрочнения поверхности [26].

Применение методов ХТО иТЦО в едином технологическом процессе исправляет параметркрупнозернистости, в результатеперегрева и другие дефекты структуры, которые обычно образуются при высокотемпературной ХТО. В процессе термоциклирования с постоянными фазовыми превращениями,образуются избыточные дефекты кристаллических строений, т.е.увеличивается плотность дислокации и концентрация вакансий. Наиболее динамично это происходит в первые термоциклы (3-5); в последующем наблюдается стабилизация уровня дефектов, что подтверждено данными рентгено-структурного анализа термо-

циклированных материалов (сталей). В результате образование при ТЦО повышенной плотности дефектов кристаллической структуры, способствуют интенсификации процесса диффузионного насыщения стали, увеличению толщины диффузионного слоя и созданию дополнительной границы (рост величины межфазных и межзеренных поверхностей).

Кинетика процессов ХТО железоуглеродистых сплавов существенно ускоряется (от 1,5 до 2 раз) при циклических нагревах и последующем охлаждении в диапазоне температур от 600 до 1000°C с последующей выдержкой 1 мин.- 1 ч. при количестве повторов от 4 до 20.

**Таким образом, анализ литературных данных показывает, что борирование сталей по методу ХТО с термоциклированием позволяет достичь заметного улучшения износостойкости, причем меньшая твердость слоев компенсируется их увеличенной пластичностью и как следствие увеличенной устойчивостью к различным ударным нагрузкам.**

#### **2.4.2 Изнашивание в гидроабразивном воздействии.**

Это изнашивание поверхности перемещающейся в массе не связанных между собой частиц абразива.

Динамику процесса изнашивания в этом случае можно представить следующим образом: в процессе работы происходит большое число микроконтактов абразивных частиц с поверхностью изнашиваемого материала, его срез или скол. Отделение частиц материала с поверхности контакта может быть результатом однократного или многократного воздействия абразива. В данном случае характерным является чисто абразивный механизм изнашивания.

Энергетику данного процесса изнашивания можно представить, как перемещение с определенной скоростью рабочей поверхности исполнительного органа машины в абразивной или гидроабразивной среде, обуславливающего этим перемещением движение определенного объема абразивной массы, равной производительности данного оборудования.

### **2.4.3. Изнашиваемые поверхности из металлических материалов.**

К этой категории следует относить все металлические материалы, в которых присутствуют карбиды железа или других элементов, обладающих металлической связью.

Металлическая связь – это тип химической связи, обусловленный взаимодействием валентных электронов в металлах с остовом положительно заряженных ионов кристаллической решетки. Межатомные расстояния в металлах значительно больше, чем в соединениях с ковалентной связью (металлический радиус атомов всегда больше ковалентного радиуса). Металлическая связь характерна не только для металлов и их сплавов, но и для металлических соединений. Энергия структуры в данном случае значительно меньше, чем у материалов с ковалентной связью, и составляет 108 кДж/моль. В идеальном случае изнашиваемая поверхность должна представлять металлическую матрицу с мелкозернистой структурой, которая удерживает карбиды, обладающие металлической связью. Расположение карбидов может быть как по всему объему металлов, так и только в поверхностном слое. Все эти параметры достигаются как технологическими методами обработки изнашиваемой поверхности, так и легированием всего объема металла.

В тоже время, следует иметь в виду, что обычные характеристики механической прочности не могут быть критерием оценки сопротивляемости металла микроударному разрушению. При обычном нагружении, напряжение в металле распределяется более равномерно. При этом многие микроскопические дефекты практически не влияют на распределение напряжения. При микроударном воздействии дефекты, расположенные в микрообъемах, чувствительны к импульсным нагрузкам и оказывают большое влияние на сопротивляемость металла разрушению. При таком характере контактного напряжения, сопротивление металла разрушению определяется не усредненными свойствами микрообъемов, а свойствами металла на отдельных микроучастках, которые могут быть на много ниже усредненных показателей механических свойств. Для материалов с гетерогенной структурой и любой неравномерной структурой, т.е. структурой

обычных металлов и сплавов при разрушении характерна значительная неоднородность в строении и свойствах. Отдельные кристаллы сравнительно легко деформируются и разрушаются, проявляя при этом очень низкую прочность. Другие, более прочные кристаллы, оказывают высокое сопротивление деформации; они удерживаются в поверхностном слое до тех пор, пока вокруг них металл не будет полностью разрушен, после чего они выпадают, поэтому структура металлической матрицы, удерживающей зерна карбида, должна обладать высоким сопротивлением микроударному воздействию [24].

Наиболее высокое сопротивление этому виду воздействия оказывает структура мартенсита. Следовательно, поверхность, подвергающаяся микроударному воздействию, должна иметь мартенситную или мартенситно-аустенитную матрицу с равномерно распределенными карбидами или боридами в объеме металла, или быть покрыта непрерывным слоем твердых карбидных зерен. При микроударном воздействии на процесс изнашивания, большое влияние оказывает величина структурного зерна. Так как сопротивление разрушению оказывает в основном поверхностный слой металла, свойства поверхностного слоя и определяют величину износостойкости при микроударном воздействии. Границы мелких зерен более совершенны, и они более правильно ориентированы одно по отношению к другому. Этим и объясняется, что металлы с мелкозернистой структурой имеют более высокую сопротивляемость микроударному разрушению, чем металлы с крупнозернистой структурой.

С позиции дислокационной структуры это связано следующим выражением:

$$\sigma = \frac{G \cdot B}{Z},$$

где  $\sigma$  - напряжение, необходимое для движения дислокации;

$G$  - модуль сдвига;

$B$  - вектор Брюггерса;

$Z$  - расстояние между частицами твердой среды в плоскости скольжения.

Данная зависимость показывает, что, чем меньше расстояние между структурными частицами упрочняющей фазы, тем выше напряжение, необходимое

для движения дислокаций, и, следовательно, меньше интенсивность изнашивания материалов. Поэтому с повышением дисперсности структурных зерен усиливается эффект торможения дислокаций, что вызывает рост износостойкости материала.

Из материалов этой группы наибольшее распространение получили легированные чугуны – белые, у которых в аустенитной матрице располагаются карбиды  $(CrFe)_7C_3$ , чугуны – перлитно-мартенситные, имеющие мартенситную матрицу, с расположением в ней доэвтектических и эвтектических карбидов железа и хрома. В целом по сталям и чугунам можно констатировать, что их износостойкость тем выше, чем больше карбидов в их структуре. Форма и расположение карбидов также влияют на износостойкость. Так при равном содержании карбидов, чугуны с пластинчатой и скелетообразной формой более износостойки, чем чугуны с карбидами шарообразной формой. От содержания легирующих элементов углерода и хрома зависит тип образующегося карбида, так при содержании хрома от 12 до 24% резко возрастает износостойкость материала. Дальнейшее увеличение содержания хрома снижает износостойкость, так как появляются хрупкие иглы заэвтектических карбидов. В структурах стали и чугунов кроме наличия карбидов для повышения износостойкости необходимо иметь высокую прочность металлической основы (матрицы), которая обеспечивается только при мартенситной и в меньшей степени при мартенситно-аустенитной структуре. Помимо этого немаловажное значение имеют форма, размер твердость и расположение карбидов, как в поверхностном слое, так и объеме материалов. Комплекс этих требований и определяет степень износостойкости структурно-однородных материалов. Он достигается применением легирующих элементов в процессе получения металла и различными видами термической и химико-термической обработки.

#### **2.4.4. Изнашиваемые поверхности из абразивных материалов.**

Абразивные материалы бывают естественного и искусственного происхождения. К естественным абразивным материалам принадлежат горные породы и материалы, обладающие высокой твердостью. Важнейшими из них являются:

1. Алмаз – наиболее твердый из всех абразивных материалов и представляет собой одну из разновидностей кристаллического углерода. Алмазы имеют ограниченное применение в виду их высокой стоимости.

2. Естественный корунд – представляет собой минерал, состоящий в основном из кристаллов окиси алюминия  $Al_2O_3$ . Имеет много различных примесей, значительно снижающих его свойства и ограничивающих его применение.

3. Наждак – состоит также из окисей алюминия с большим количеством примесей окисей железа и силикатов. По минералогическому составу весьма неоднороден.

4. Кварц – один из распространенных минералов, представляющих собой чистый кремнезем  $SiO_2$ . Нашел в различных областях промышленности широкое применение.

Для различных отраслей промышленности широкое применение нашли, главным образом, искусственные абразивные материалы, такие как:

1. Электрокорунд – искусственный абразивный материал, состоящий из кристаллической окиси алюминия  $Al_2O_3$ , получается путем плавки в электрических печах пород, богатых окисью алюминия (глинозема, бокситов). Полученная масса дробится на специальных дробилках в зерна различной величины, которые тщательно очищают и сортируют по размерам.

В зависимости от содержания в электрокорунде окиси алюминия различают:

а) Электрокорунд нормальный (алунд), содержащий менее 80% кристаллической окиси алюминия.

б) Электрокорунд белый (корракс), содержащий до 97-99% окиси алюминия.

С увеличением содержания окиси алюминия твердость электрокорунда повышается. Однако зерна белого электрокорунда, имеющие сравнительно гладкую поверхность, сцепляется со связующим материалом в изделиях несколько хуже, чем зерна нормального электрокорунда, а , следовательно, менее прочно удерживаются в связующем материале.



в) Монокорунд – представляет собой разновидность электрокорунда. Отличается высокой прочностью. Изделия из него имеют стойкость в 2 раза выше, чем из нормального электрокорунда.

г) Карбид бора ( $B_4C$ ) – обладает высокой твердостью и большой хрупкостью. Получают сплавление технической борной кислоты и нефтяного кокса в электрических печах. После дробления получают зерна с острыми кромками.

д) Карбид кремния – представляет собой соединение кремния с углеродом и получается путем электроплавки чистого кварцевого песка с коксом. Зерна карбида кремния имеют высокую твердость и дают при дроблении острые режущие кромки.

е) Электрокорунд используют в данном случае благодаря его твердости и сравнительно низкой стоимости. Структура поверхности изнашивания получается двухфазной, состоящей из зерен электрокорунда, которые связаны бакелитовой связкой.

Это можно представить как структуру, твердая фаза которой, удерживается в объеме материала от выбивания абразивными частицами изнашивающего материала или вымывания, матрицей, состоящей из бакелитовой смолы.

Существенным недостатком данных изделий является то, что по мере старения бакелитовой связки в процессе эксплуатации начинают выбиваться или вымываться частицы корунда из абразивной поверхности. В целом метод корундирования очень перспективен за счет применения абразивных материалов большей структурной однородности и твердости, а также связок (матриц), обладающих увеличенной способностью удерживать абразивные зерна на изнашиваемой поверхности и менее склонных к химическому старению.

2. Метод каменного литья. Заключается в том, что из материала кристаллического строения искусственно получаемого из диабазов, базальтов, доменных шлаков или шлаков производства ферро-марганцев, обладающего значительным сопротивлением абразивному воздействию, получают изделия, способные защитить изнашиваемые поверхности. Ценным свойством материала каменного литья является его высокая твердость и значительная сопротивляемость абразивному воздействию. Вместе с тем, данные поверхности имеют существенные

недостатки, сдерживающие широкое применение данного метода. Это высокая хрупкость материала, малая термостойкость, невозможность механической обработки, значительная усадка при литье готовых изделий (до 17%). Все это осложняет производство из него изделий, особенно крупногабаритных и со сложной конфигурацией поверхности.

#### **2.4.5. Изнашивание в газоабразивном и гидроабразивном потоках.**

Главной характеристикой газоабразивного и гидроабразивного потоков является то, что содержание в них не связанных между собой абразивных частиц не должно превышать 50% объема. В этом случае частицы находятся во взвешенном состоянии благодаря движению газа или жидкости.

Газоабразивный износ характерен для оборудования, используемого при сухих методах обогащения минерального сырья, процессах перекачивания в различных видах насосов.

Гидроабразивный износ характерен для перекачивающего оборудования, оборудования, работающего в мокрых схемах обогащения полезных ископаемых. В этом случае изнашивание происходит абразивными частицами, перемещающимися с потоком воды. В данном случае абразивные частицы, как и в газоабразивном потоке, не связаны между собой и находятся во взвешенном состоянии благодаря движению гидроабразивного потока пульпы.

Изменение характеристик насоса при перекачке воды с абразивом, связана с изменением гидравлических потерь, в каналах вращения рабочего колеса образуются вихревые зоны и происходит разрыв потока

Мощность насоса при работе на суспензии может быть определена как:

$$N = N_u \frac{\gamma_c}{\gamma_s} + \Delta N$$

$$\Delta N = 2,010^{-4} r_2^{4,6} \omega^{2,5} \gamma^{0,8} \left[ \mu_c^{0,2} - \left( \mu_s \frac{\gamma_c}{\gamma_s} \right) \right] \text{ л.с}$$

$N_c, N_v$ - мощности насоса на суспензии и на воде, л.с

$\gamma_c, \gamma_v$ - объемный вес суспензии и воды, кг/м<sup>3</sup>

$r_2$ - радиус рабочего колеса

$\omega$ - скорость вращения рабочего колеса 1/с

$\mu_c, \mu_v$ - динамический коэффициент вязкости суспензии и воды кг/с/м<sup>2</sup>

$\Delta N$  - приращение мощности насоса, вызванное непропорциональным изменением потерь дискового трения, л.с.

Экспериментальные данные свидетельствуют, что объемный вес перекачиваемой суспензии оказывают влияние на режим течения, следовательно и на изнашивание.

Мощность насоса при работе на суспензии, возрастает по мере увеличения объёмного веса.

Формула износа может быть упрощена:

$$\Delta N = 2,010^{-4} r_2^{4,6} \omega^{2,8} \gamma_c^{0,8} A, \text{ л.с.}$$

A- размерный коэффициент, определяемый для суспензии  $A=f(\gamma_c)$

В части потока, непосредственно обтекающих лопасть, имеет место существенное изменение скоростей течения от скорости входа в рабочее колесо до нулевой скорости в точке натекания потока на лопасть и скорости потока в межлопаточном пространстве.

Следовательно, износ будет в различных точках различным.

(Литература: Стенд для испытания центробежных насосов. «Добыча угля открытым способом» Реферативный сборник №5 ,1972). Механизмы действия при гидро- и газоабразивном изнашивании аналогичны и представляют собой многочисленные удары абразивных частиц на микро-участке изнашиваемой поверхности.

Изнашивание происходит, главным образом, в результате удаления пластически выдавленного металла из лунок, образованных ударом частиц. Металлы, твердость которых выше твердости абразивов, разрушаются в следствии цикловой усталости от переформирования поверхностного слоя при многократном микровоздействии абразивных частиц. Энергетическое воздействие при гидроабразивном определяется скоростью движения соответствующего потока относительно изнашиваемой поверхности и его массы.

Известно, что сопротивление металла гидроабразивному изнашиванию существенно зависит от твердости поверхностного слоя (рис.24), которая определяется химическим составом, структурой и режимами термической обработки.

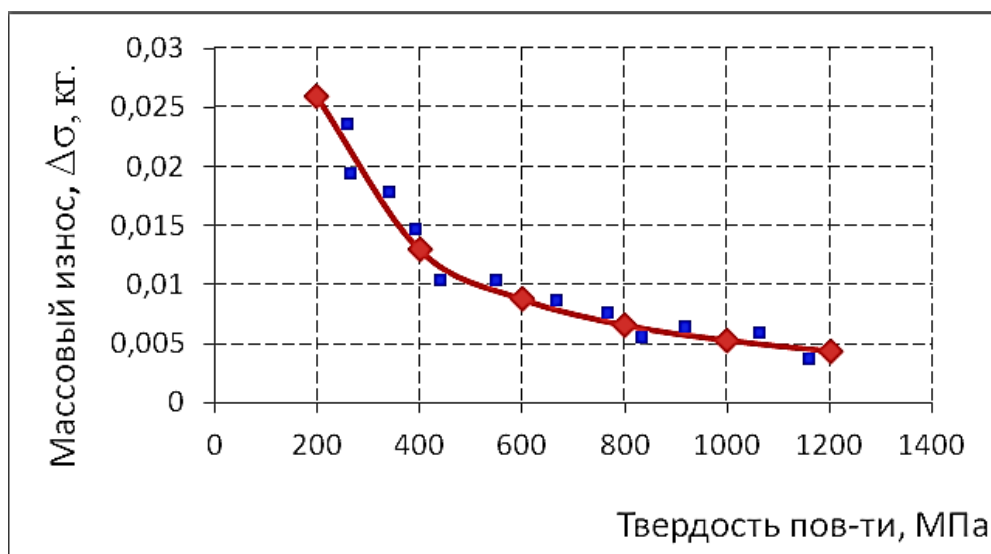


Рисунок 24. Зависимость износа от твердости поверхности.

Из этой зависимости следует, что минимальный износ достигается при твердости поверхности 1000-1200 МПа.

При расчете массы гидроабразивного потока учитывается и масса жидкости, в которой и вместе с которой перемещаются абразивные частицы. Кроме этого, при определенных условиях на изнашиваемую поверхность при воздействии гидроабразивного потока действуют струеударный и кавитационные процессы, которые интенсифицируют процесс изнашивания. С учетом всего этого, а также расклинивающего действия жидкости изнашивание гидроабразивным потоком можно отнести к самому интенсивному виду абразивного изнашивания.

И. Битнер представляет гидро- и газоабразивное изнашивание совокупностью процессов микрорезания и полидеформационного разрушения.

М.М. Тененбаум в своих работах основным кинематическим параметром гидроабразивного изнашивания считает угол атаки, т.е. угол наклона вектора скорости абразивных частиц к изнашиваемой поверхности. Переход от нормального удара к скользящему сопровождается изменением условий внешнего воздействия на

изнашиваемую поверхность и соответственно количественным и качественным изменениям процесса изнашивания.

И.Р. Клейс и Х.Х. Уэмыйс делают вывод, что изнашивание материалов в абразивной среде – сложный процесс и в комплекс изнашивания могут входить:

1. Разрушение поверхности в результате высоких контактных напряжений.
2. Срез микростружек абразивной частицей.
3. Контактная усталость.
4. Выплавление материала в результате высокой температуры в месте удара абразивной частицы на изнашиваемой поверхности.

Влияние каждого фактора в конкретном случае определяется физико-механическими свойствами как абразива, так и материала изнашиваемой поверхности, скоростью и углом атаки абразивной струи.

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 пульпы 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 (рис.25). 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 насосов.

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 в широком диапазоне размеров (рис.26), 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.

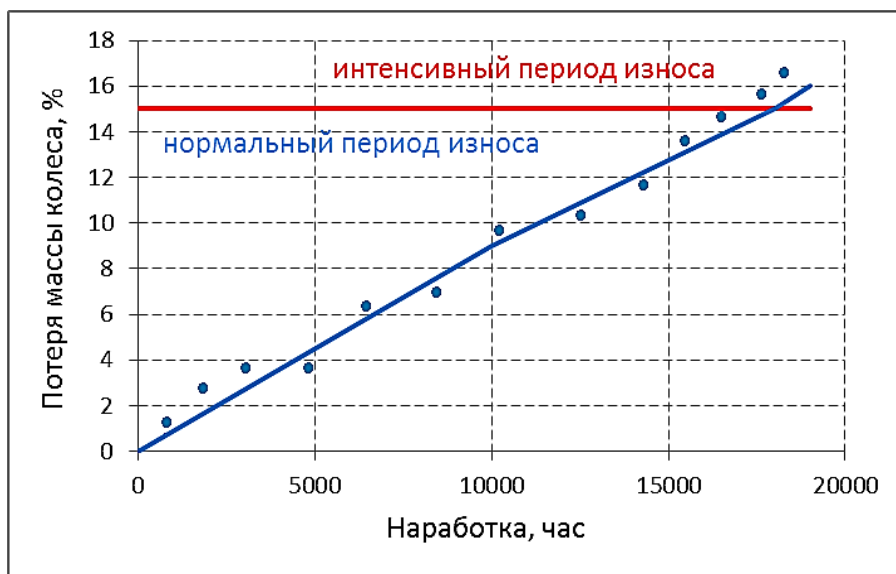
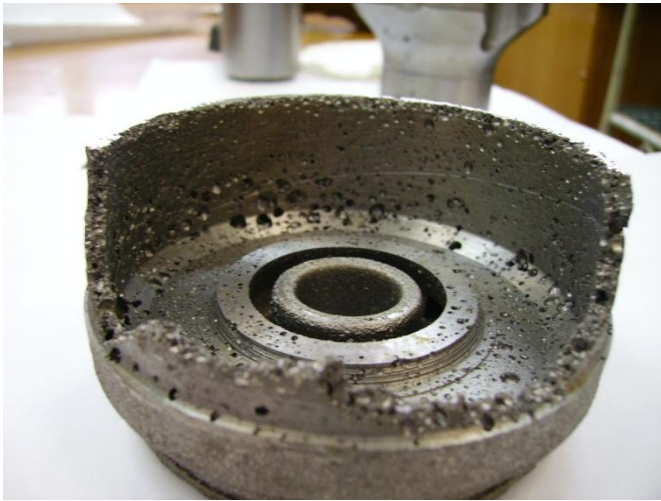


Рисунок 25. Зависимость ресурса рабочего колеса от износа.

Рисунок 26. Дефекты на поверхности отливок — поры, раковины (после обычного литья).





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.

Для расчета износа базовых рабочих изготовленных из чугуна, предложено, применительно к течению жидкости в насосе:

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

где  $\Delta\sigma$  - массовый износ образца;

$k$  - коэффициент пропорциональности;

$\alpha_1$  - коэффициент, учитывающий меж.зерновое пространство между частицами;

$\rho_a$  и  $\rho_M$  - плотность соответственно абразивной частицы и изнашиваемого материала;

$B$  - объем ударяемой воды;

$n$  - содержание абразивных частиц в воде;

$\tau$  - 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 (чугун 500МПа).

Для оценки износостойкости металлов при изнашивании их запыленным потоком, Г.М. Патеюк предложил формулу, которая основывается на анализе энергии при соударении тел: (это применимо и к гидроабразивному изнашиванию в насосах, когда жидкость перемещается с определенной скоростью)

$$I = k \cdot \gamma \cdot \frac{m \cdot V_0^2}{2},$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности;

$\gamma$  - коэффициент потери энергии при ударе;

$m$  - масса частицы;

$V_0$  - скорость частицы.

Коэффициент потери энергии  $\gamma$  при скользящем и нескользящем ударах абразивной частицы об изнашиваемую металлическую поверхность зависит от коэффициентов восстановления нормальных и касательных импульсов, угла падения частицы, коэффициента трения и угла атаки.

Согласно расчетам, износ базового рабочего колеса, выполненного из чугуна, составляет:

$$\Delta\sigma = \frac{0.76 \cdot 0.8 \cdot 1.5 \cdot 7 \cdot 0.08 \cdot 0.2 \cdot 48 \cdot 2.5^3 \cdot (1 - 0.6^2)}{0.3 \cdot 9.8 \cdot 3.14 \cdot 1 \cdot 500} = 0.010 \text{ кг}$$

Анализ показывает, что износ поверхности рабочих колес напрямую зависит от твердости самой поверхности. Можно констатировать, что в не зависимости от угла атаки абразивных частиц на изнашиваемую поверхность, износ происходит в результате однократного или многократного пластического деформирования в зависимости от силы удара абразивной частицы об изнашиваемую поверхность. Механизм этого явления может быть следующий, в зависимости от угла атаки, либо удаляется пластически выдавленный металл из лунок, образованных однократным или многократными ударами частиц, либо абразивные частицы, врезаясь на микроучастке в изнашиваемую поверхность режет стружку или царапает ее. Это зависит от энергии движения частицы относительно изнашиваемой поверхности. Без наличия энергетической составляющей износа быть не может.



#### 2.4.6. Энергетика процесса абразивного изнашивания.

Скорость абразивной массы относительно рабочей поверхности определяет энергетическое воздействие. В связи с этим энергетическое воздействие на изнашиваемую поверхность определяется скоростью движения абразивных частиц или скоростью перемещения рабочего органа оборудования относительно абразивной массы в единицу времени, величина которой равна производительности данного оборудования.

$E = \frac{m \cdot V^2}{2}$ , (следует обратить внимание на то, что скорость в различных участках колеса не одинакова)

где  $V$  - скорость перемещения абразивного потока или поверхностей рабочего органа технологического оборудования, определяющих производительность на данной операции;

$m$  - масса абразивной среды на каждой технологической операции, равной производительности оборудования (это известно в насосах и можно рассчитать).

$E$  – это энергия воздействия на рабочие поверхности оборудования.

Для характеристики данной энергии следует внедрить термин плотности энергии воздействия  $P$  - который является отношением значения энергии воздействия к значению рабочей поверхности. В тех случаях, где плотность энергии больше, при всех других равных условиях, больше и сам износ и, в результате этого, меньшая износостойкость деталей машин. По данному значению можно сопоставить износостойкость как аналогичного оборудования, используемого на одном технологическом процессе, так и всех деталей машин, входящих в технологические схемы горно-обогатительных процессов. Это справедливо если рассматривать группу насосов или другого оборудования, работающего совместно.

Суммируя плотности энергии влияния каждого показателя оборудования единой технологической схемы:

$$\sum P' = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

и сопоставляя с другой схемой, выполняющей аналогичной операцией процесса:

$\sum P'' = P''_1 + P''_2 + P''_3 + \dots + P''_n$ , делается вывод, оборудование какой из двух или нескольких аналогичных схем обладает большей долговечностью.

Величина энергии воздействия не вся расходуется на износ рабочей поверхности, часть ее тратится на внутреннее трение между абразивными частицами, определенное количество частиц не достигает рабочей поверхности в силу ее закрытости другими абразивными частицами. Для определения величины энергии непосредственно расходуемой на изнашивание необходимо иметь эталонную характеристику и четко установленную величину энергии, потраченной на износ единицы объема или массы. Тогда методом сравнения объемов или массы износа поверхности рабочего оборудования, изготовленного из эталонного металла и теоретического износа эталонного металла можно получить значение энергии, потраченной непосредственно на износ в данном конкретном случае.

Происхождение абразива, его механические параметры и химические показатели, в большой степени оказывают влияние на интенсивность изнашивания. При изменении минералогического состава перекачиваемого материала, изменяется интенсивность изнашивания рабочих поверхностей оборудования, что может привести к снижению долговечности обогатительного оборудования. Погружной насос центробежного типа в коррозионностойком исполнении используется для работы в скважинах с содержанием сероводорода до 0,125% (до 1,25 г/л) в откачиваемой жидкости.

Возможность абразивного элемента создавать определенное напряжение в местах взаимодействия (контакта) с поверхностью деталей зависит от микротвердости абразива, а также от его прочностных параметров. Большим параметром твердости и прочности абразивного элемента, соответствует его большая способность к проникновению в изнашиваемую поверхность и разрушению ее материала при взаимном перемещении.

Микротвердость абразивных материалов это один из важнейших параметров которые определяют интенсивность изнашивания.

Уэкс Н. и Веллингер и доказали, что интенсивность разрушения поверхности материала абразивными элементами сильно зависит не только от их твердости, но и

от их прочности, хотя определение прочности абразивных зерен представляет из себя значительную трудность, в связи с тем, что они, как правило, имеют неправильную форму и различную остроту граней. К тому же следует учитывать, что расположение и количество различного рода дислокаций в частицах может быть различным и часто зависит непосредственно от месторождения, где добыт данный материал. В работе [21] установлена зависимость между прочностью отдельных зерен абразивов и их изнашивающей способностью.

Таблица 9. Изнашивающая способность и механические свойства зерен кварца и магнезита.

| Материал зерна   | Механические свойства    |                                                        |                                                                    | Износ эталонного материала |
|------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------|
|                  | Микротвердость Н.М., ГПа | Прочность или раздавливаемость зерен массой 2-10 кг, % | Разрушающая нагрузка Р, полученная при штучном раздавливании зерна |                            |
| $SiO_2$ , кварц  | 13,2 – 16,0              | 55                                                     | 8,0 – 3,4                                                          | 58                         |
| $MgO$ , магнезит | 11,3 – 12,6              | 57                                                     | 14,6 – 6,7                                                         | 100                        |

Разрушение абразивных зерен сопровождается образованием новых поверхностей и требует мгновенного приложения энергии, которое передается в контактные микро-участки поверхностного слоя. Насыщение энергией в процессе испытания зерен магнезита происходило до величины, достаточной для разрушения каждого зерна на очень мелкие пылевидные частицы. При этом обладая значительной прочностью, по сравнению с зернами кварца, они в состоянии аккумулировать, а следовательно и передать микрообъемы изнашиваемого металла большее количество энергии, вызывая этим самым более значительные разрушения, чем кварц.

Зерна кварца при меньшей прочности не в состоянии накопить энергию, необходимую на их разрушение до пылевидной фракции, и поэтому разрушаются до состояния осколков значительных размеров, следовательно, передача энергии зернами кварца отдельным микрообъемам металла, происходит импульсами меньшей величины. Характер разрушения материалов и различная интенсивность изнашивания ими металлов связана с их кристаллическим строением. Сложный тип структуры кварца обуславливает значительную анизотропию свойств по кристаллическим плоскостям, что приводит к легкому их разрушению при сравнительно небольшой нагрузке.

В простой гексогональной и центрированной кубической решетке магнезита распределение напряжений происходит более равномерно и разрушение наступает при большей величине внешней нагрузке. Поэтому магнезит изнашивает поверхность более интенсивно, чем кварц. Таким образом, материалы, прочность которых позволяет накопить до разрушения большее количество энергии, обладают большей абразивной способностью.

Размер абразивных зерен оказывает заметное влияние на интенсивность изнашивания, хотя следует отметить, что влияние не одинаково при различных видах абразивного изнашивания. Так, при трении скольжении по монолитному абразиву и движении в абразивной и гидроабразивной массе интенсивность изнашивания не изменяется, даже при достижении определенных геометрических параметров абразивных частиц.

В случае незначительных геометрических параметров абразивных частиц, их способность производить микрорезание и пластические деформации снижается. В этом случае в поверхностных слоях изнашиваемого материала возникают незначительные деформации и как следствие этого превращения в металле протекают не полно. С ростом величины абразивного зерна увеличивается напряжение, возникающее в зоне контакта абразивных частиц и изнашиваемой поверхности металла. В этом случае интенсивность изнашивания возрастает за счет микрорезания и пластического изменения. Последние исследования дали возможность получить логарифмические зависимости величины изнашивания от

гранулометрического состава гидроабразивной пульпы с различным содержанием в ней твердого вещества от 5 до 50 % объема потока.

Среднее значение удельного износа поверхности при воздействии пульпы с более крупным гранулометрическим составом в 2,7 раза превышает удельный износ при воздействии пульпы с менее крупным гранулометрическим составом.

При всех видах абразивного изнашивания решающими факторами, характеризующими изнашивающую среду и влияющими на интенсивность изнашивания поверхности, является величина энергии абразивного воздействия, твердость и прочность абразивных частиц, а также размер их зерна (гранулометрический состав). Механизм воздействия этой среды носит микроударный характер. Таким образом мы рассмотрели среду, которая вызывает изнашивание.

#### **2.4.7. Изнашиваемые поверхности.**

Увеличению показателям сопротивления абразивному износу способствуют такие параметры, как твердость и однородность структуры, используемых материалов для изготовления поверхностей горно-обогатительного оборудования. Кроме этого, при ударно-абразивном изнашивании материал поверхности должен обладать низкой хрупкостью и достаточными механическими свойствами, чтобы выдержать ударные нагрузки.

Для однородных по своей структуре материалов зависимость износа можно выразить неравенством:

$$H_M > H_a,$$

где  $H_M$  - твердость материала изнашиваемой поверхности;

$H_a$  - твердость абразива.

При таком положении теоретически износа поверхности не должно быть [12]. Однако он существует и это можно объяснить только дефектами структуры материала.

Данную зависимость для структурно-неоднородных материалов можно выразить аналитическим образом:

$$\varepsilon = \sum_1^n d_i \cdot \varepsilon_i,$$

где  $\varepsilon$  - износ материала поверхности;

$\varepsilon_i$  - износ компонента(входящего в структуру материала);

$d_i$  - объем отдельного компонента в структуре материала;

$n$  - число компонентов, входящих в структуру материала.

Анализ данной зависимости показывает, что при низких значениях износа отдельно взятых компонентов и больших объемах в структуре изнашиваемого материала, сам параметр износа меньше в целом. При этом нужно помнить, что данная зависимость не учитывает взаимодействие структурных взаимосвязей между различными кристаллами компонентов, которые входят в границы материала, и расстояния между ними, и то, что при слабых связях и относительно больших расстояниях приводит к простому выдалбливанию зерен из структуры или их вымыванию при гидроабразивном изнашивании.

Структурная связь – это связь, соединяющая отдельные кристаллы и придающая материалу определенную механическую прочность и прочные связи между кристаллами в процессе получения данного материала. Указанное выражение справедливо и для структурно-однородных материалов. Присутствие дефектов изнашиваемых поверхностей уменьшает межатомные связи и интенсифицирует процесс изнашивания.

Рассчитаем линейный износ лопастей рабочих колес, учитывая при этом, что твердость базовых колес, выполненных из чугуна, составляет 500 МПа:

$$\Delta S = \frac{k \cdot f(P_1 \cdot D_r \cdot C) \psi \cdot \beta \cdot \rho_M \cdot \omega^3 \cdot t}{2 \cdot \gamma_M \cdot H_M} = \frac{0.76 \cdot 0.8(0.3 \cdot 117 \cdot 0.4) 0.6 \cdot 1.7 \cdot 2.5^3 \cdot 24}{2 \cdot 7.9 \cdot 500} = 1.701 \text{ мм}$$

Рассчитаем линейный износ поверхности рабочих колес выполненных из чугуна:

$$\Delta S = \frac{P_1 \cdot \psi \cdot \beta \cdot \rho_T \cdot \omega^2 \cdot l \cdot q \cdot N}{2 \cdot \gamma_M \cdot H_M} = \frac{0.3 \cdot 0.6 \cdot 1.7 \cdot 2.5^2 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 0.3}{2 \cdot 7.9 \cdot 500} = 0.004 \text{ мм}$$

где, **k**- коэффициент пропорциональности, **f**- коэффициент, учитывающий меж.зерновое пространство между частицами, **P1**- концентрация гидросмеси, **ω**- относительная скорость потока, **Dr** –размер канала, **C**- коэф. лобового сопротивления частицы, **ψ**- коэф. учитывающий число контактов, **β**- коэф. подобия, **ρМ**- плотность материала, **γм** – удельный вес изнашиваемого материала, **Нм**- твердость материала, **t**- время испытаний, **l**- расстояние между частицами, **N**- количество частиц, **q**- объем твердой частицы.

Из анализа линейного износа лопастей рабочего колеса и поверхности видно, что износ, на прямую зависит от твердости поверхности.

В результате абразивного износа происходит разрыв межатомных связей, который приводит к отслоению одной части кристаллической решетки от другой и созданию новых поверхностей. Данные процессы подразумевают определенные энергетические затраты осуществляются, когда металлу требуется определенная энергия.

Разрушение станет возможным только тогда, когда рабочая поверхность будет перенасыщена энергией для разрыва межатомных связей, и создания трещин.

Количество повторов в процессе износа, которые необходимы для накопления энергии вметалле и будетдостаточна для разрушения составит:

$$m = \frac{E_M}{E_a},$$

где  $E_M$  - энергия, поглощаемая изнашиваемой поверхностью;

$E_a$  - энергия абразива.

Количественный показатель энергии, поглощаемый поверхностью которая изнашивается, в большей степени определяющая влияние к сопротивлению износа абразивными деталями, зависит от энергоемкости процессов, происходящих в материале при контакте с абразивом.

Принципы высокой твердости и прочности межкристаллических связей легли в основу создания материалов, стойких к гидроабразивному изнашиванию.

Это могут быть материалы имеющие в структуре фазы с высокой твердостью: карбиды, бориды, силициды

| Функция | Уравнения           | Коэффициенты |         |        | Коэффициент корреляции |
|---------|---------------------|--------------|---------|--------|------------------------|
|         |                     | A            | B       | C      |                        |
| F(%Cr)  | $y = A + Bx + Cx^2$ | 1,295        | -0,28   | 0,399  | 0,529                  |
| F(%Mn)  | $y = A + Bx + Cx^2$ | 9,326        | -7,852  | 1,969  | 0,385                  |
| F(%Ti)  | $y = A + Bx + Cx^2$ | 1,296        | 4,225   | -2,91  | 0,392                  |
| F(%Mo)  | $y = A + Bx$        | 2,174        | 0,344   | -      | 0,390                  |
| F(%B)   | $y = Ae^{Bx}$       | 1,11         | -0,357  | -      | 0,623                  |
| F(%C)   | $y = A + Bx + Cx^2$ | 8,167        | -17,627 | 11,986 | 0,708                  |

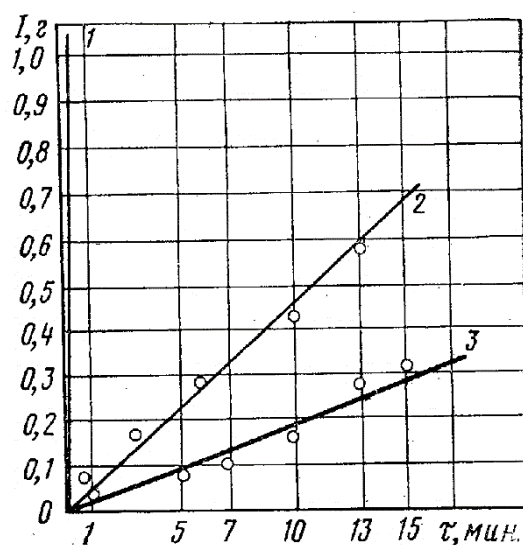
#### 2.4.8. Оработка энергосберегающей технологии модернизации поверхности рабочих колес

Жидкофазные технологии модифицирования поверхности рабочих колес – один из наиболее перспективных методов способный повысить износостойкость (рис.27).

Эти способы характеризуются широким спектром возможностей в плане выбора исходных ингредиентов, а также составов получаемых покрытий. Однако, получение качественного слоя во многих случаях представляет собой весьма сложную проблему, и, кроме того, бывает трудно обеспечить хороший уровень адгезии покрытия к подложке. Для решения задачи модернизации поверхности рабочего колеса этот метод может рассматриваться как перспективный в случае, если будут найдены способы преодоления указанных проблем.

Рисунок 27. Износостойкость:

- 1- не модифицированный материал,
- 2- модифицированный не термообработанный материал,
- 3- модифицированный термообработанный материал.



Существенные преграды на пути широкого



распространения этого метода состоят в следующем. Исходная жидкофазная композиция, которая должна быть нанесена на поверхность детали, содержит, как правило, от 20 до 80% конечного вещества. Это значит, что значительную часть промежуточного вещества необходимо удалить некоторым методом – обычно нагревом. При этом происходят процессы усадки с образованием трещин, пор и др. дефектов. Создать при этом плотную и изнosoустойчивую структуру покрытия довольно трудно.

Дополнительным отрицательным фактором является использование высокотемпературных обработок, что не только усложняет технологический процесс, но и создает опасности нежелательного воздействия на структуру основного металла.

В настоящей работе эти задачи были решены за счет использования оригинального технологического приема – использования литейной формы и тепловой энергии расплава при отливке в форму для создания модифицирующего слоя с заданными характеристиками.

В основе разработанной нами интегрированной технологии (ИТ) лежит метод нанесения на внутреннюю поверхность литейной формы модифицирующего слоя.

Формовка образцов осуществлялась вручную, форму изготавливали из песка с жидким стеклом. Формы высушивали, пропуская через них углекислый газ.

В качестве предшественника модифицирующего слоя использовались многокомпонентные жидкофазные композиции (МЖК), разработка которых потребовала больших усилий – интеллектуальных и технических.

Всего было испытано 5 композиций.

В композиции входили – жидкость, твердый наполнитель и специальные добавки.

Жидкофазная компонента:

-кремнесодержащие; кремневая кислота, кремнезоли, полисилоксаны, органосиланы;

- алюмосодержащие – оксихлориды, оксинитраты, полиалюмооксаны.

-твердые порошковые наполнители – кремнезем, кварц, муллит, корунд, глинозем, нитриды кремния, алюминия, бора; карбиды кремния, алюминия, бора.

-специальные добавки для обеспечения необходимого уровня адгезии многокомпонентных жидкофазных композиций (МЖК) к литьевой форме, жертвенные вещества для придания МЖК временной прочности – поливиниловый спирт, полиэтиленоксид и др.

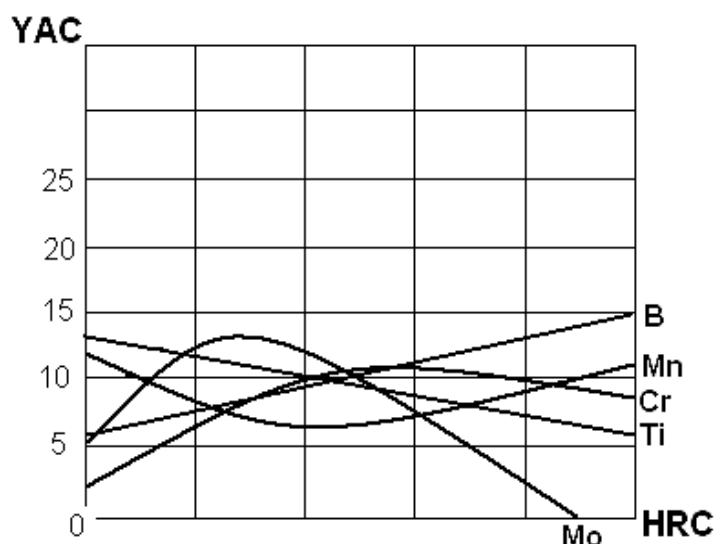


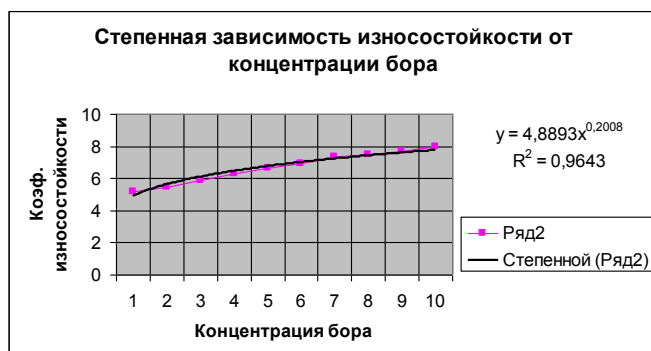
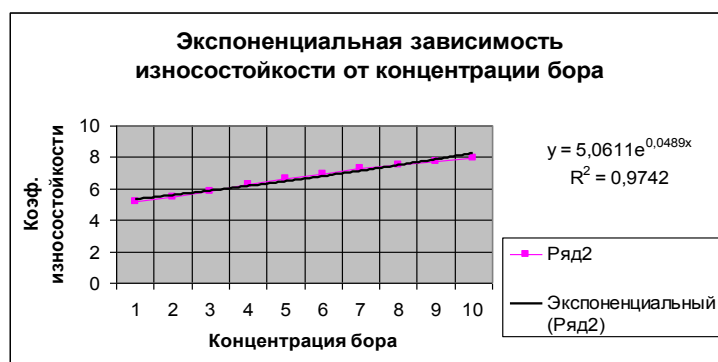
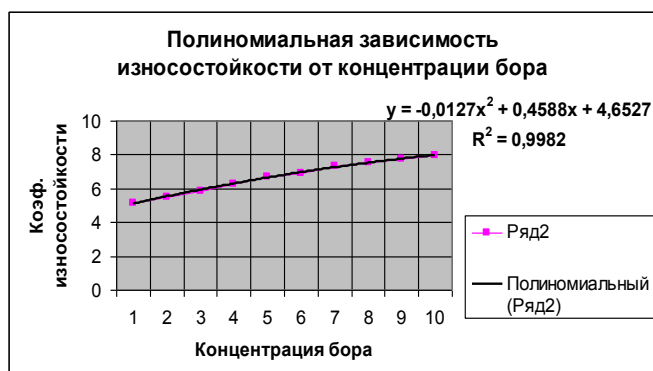
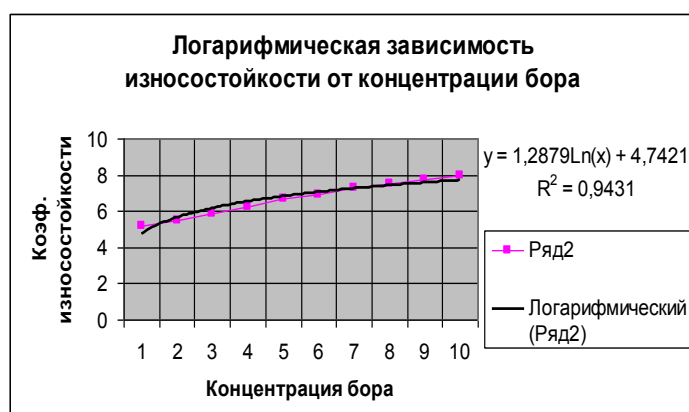
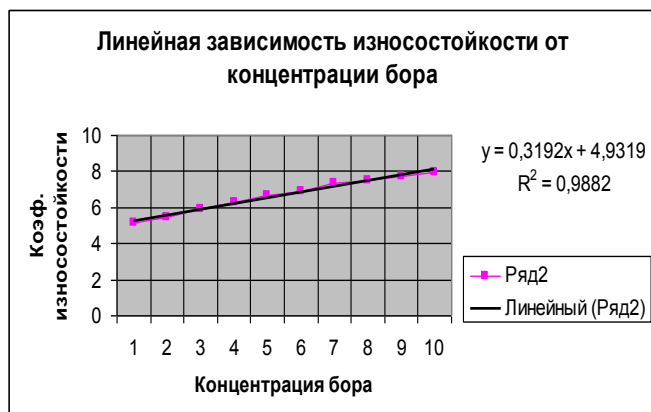
Рисунок 28. Абразивный износ. YAC -ударноабразивный износ, HRC-твердость

Как следует из приведенных данных наибольшее влияние на износ материала оказывают В (бор) и С(углерод).

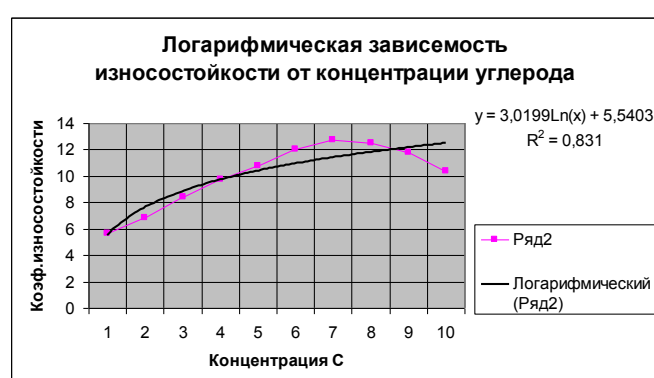
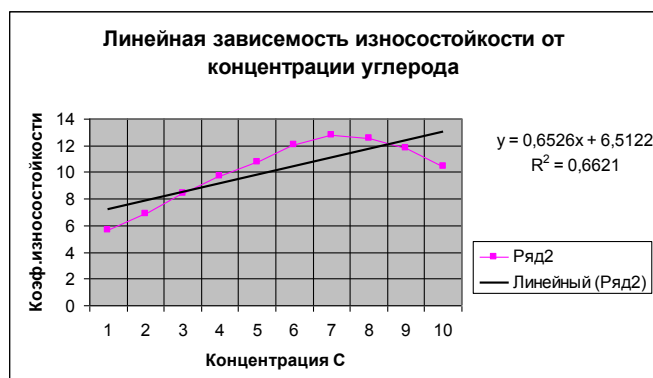
Для обоснования метода повышения ресурса рабочего колеса проведен анализ зависимости влияния углерода, бора, хрома, марганца на износостойкость.

Приведенные ниже зависимости влияния концентрации химического элемента на коэффициент износостойкости 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[126].

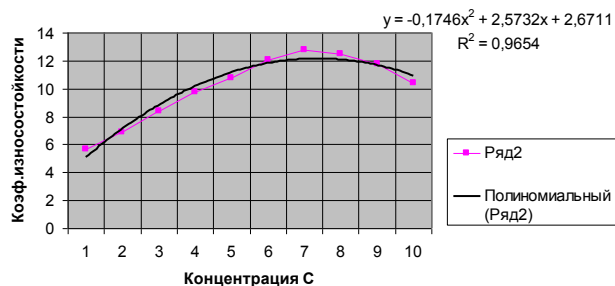
## 1. БОР



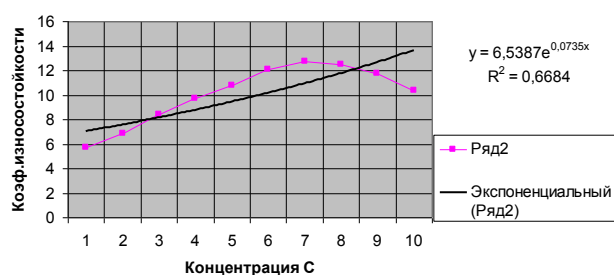
## 2. УГЛЕРОД



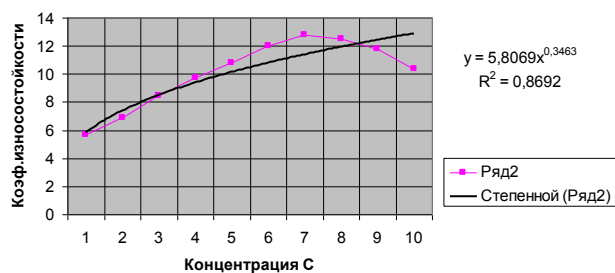
**Полиномиальная зависимость износостойкости от концентрации углерода**



**Экспоненциальная зависимость износостойкости от концентрации углерода**



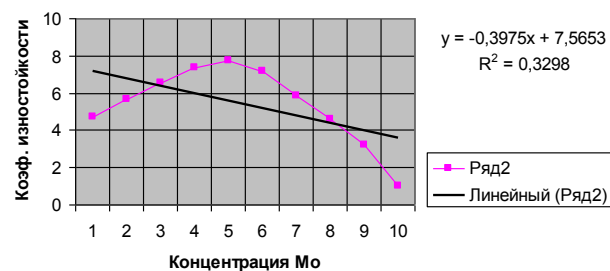
**Степенная зависимость износостойкости от концентрации углерода**



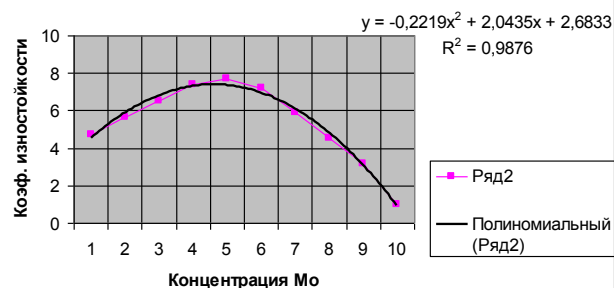
Углерод также влияет на износ при соответствующих концентрациях его в сталях и чугунах

### 3. МОЛИБДЕН

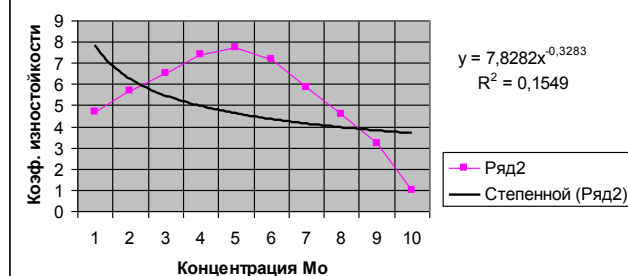
**Линейная зависимость износостойкости от концентрации молибдена**



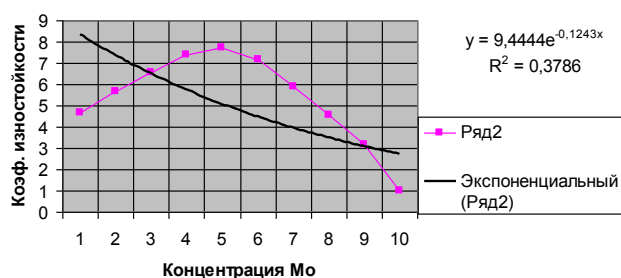
**Полиномиальная зависимость износостойкости от концентрации молибдена**

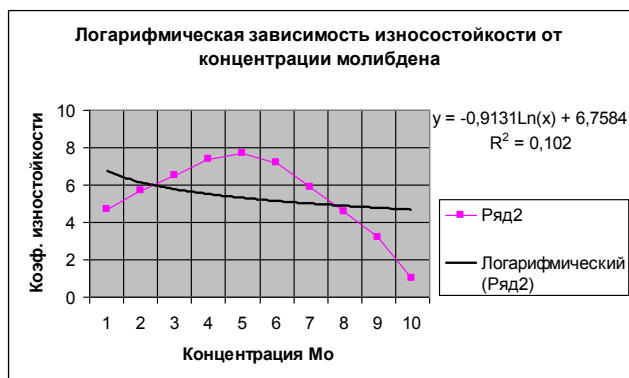


**Степенная зависимость износостойкости от концентрации молибдена**



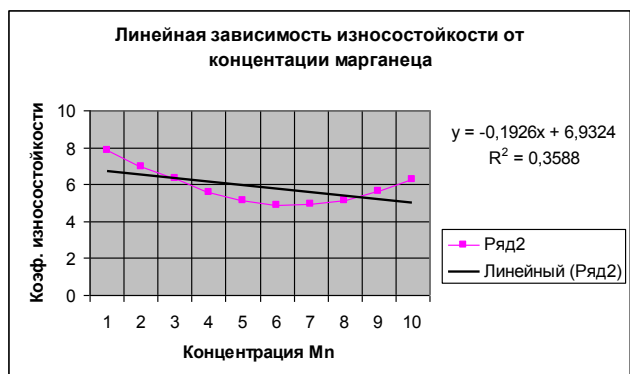
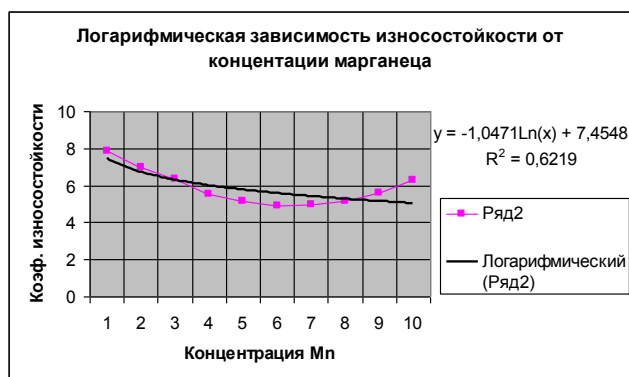
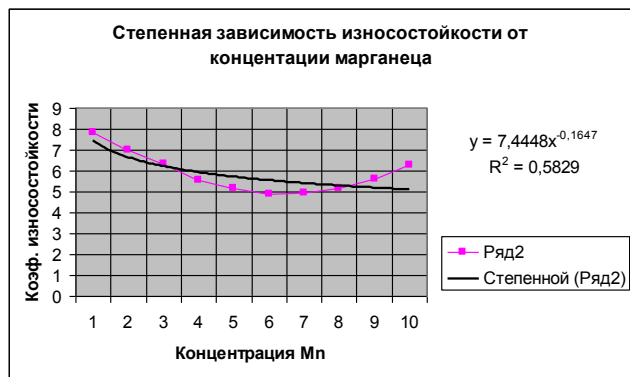
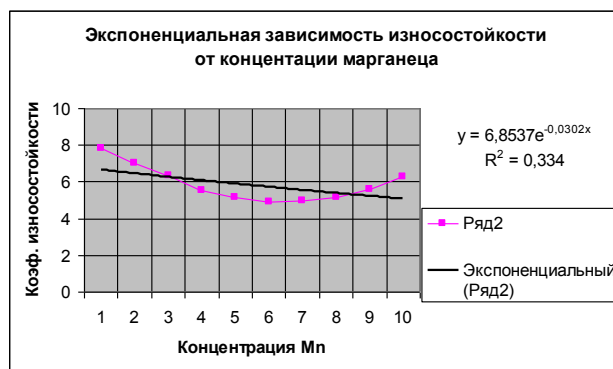
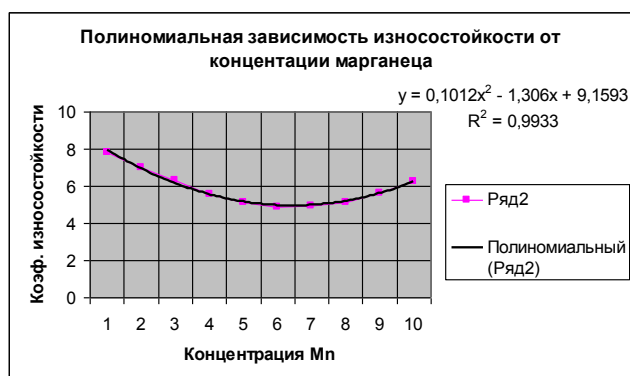
**Экспоненциальная зависимость износостойкости от концентрации молибдена**





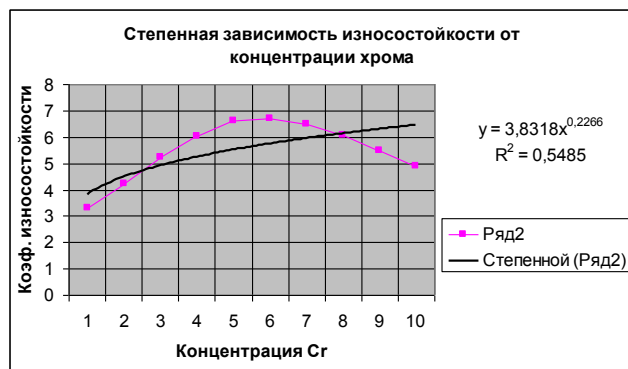
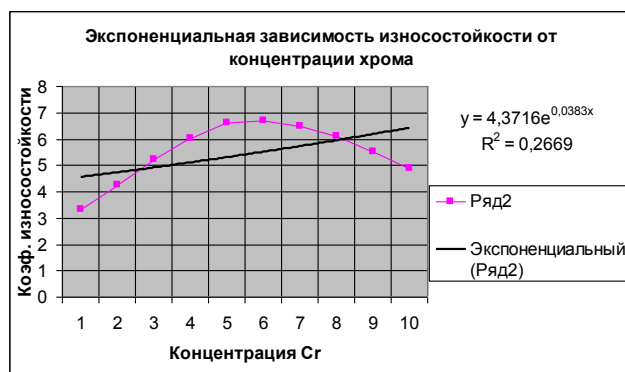
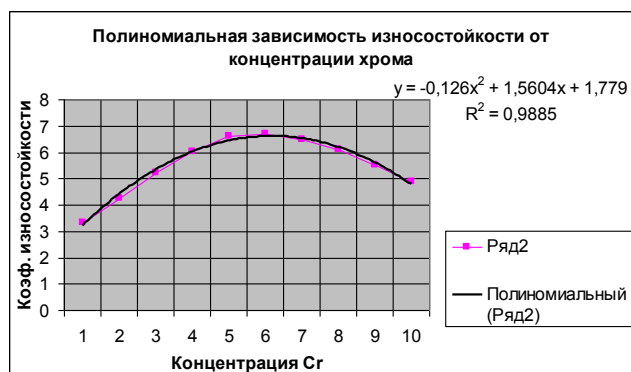
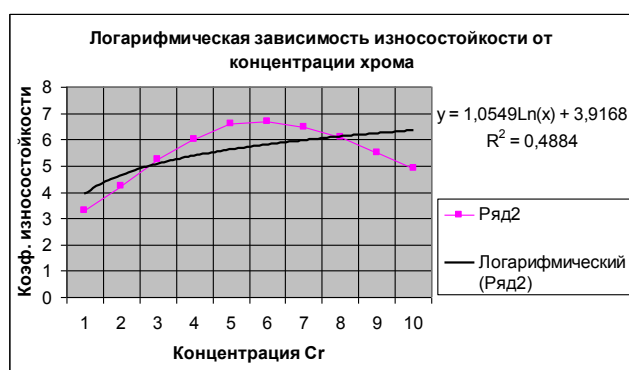
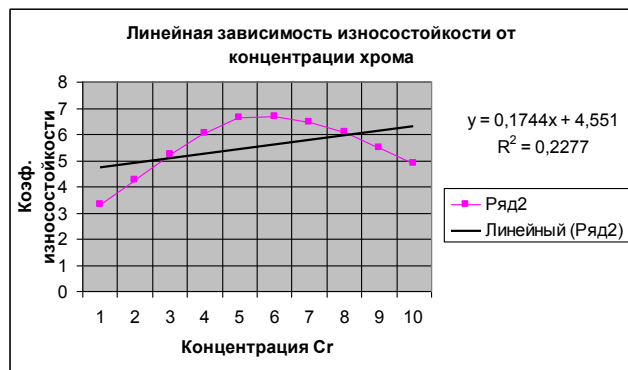
Молибден практически не влияет на изнашивание

## 4. МАРГАНЕЦ



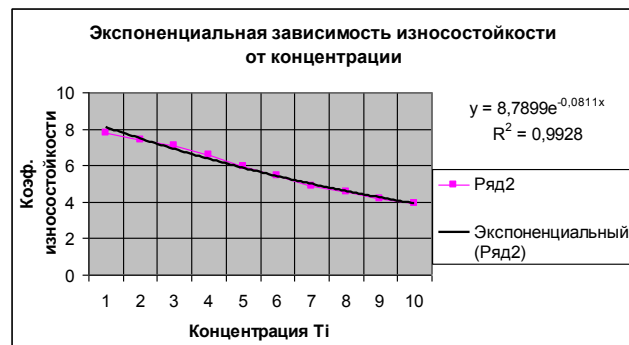
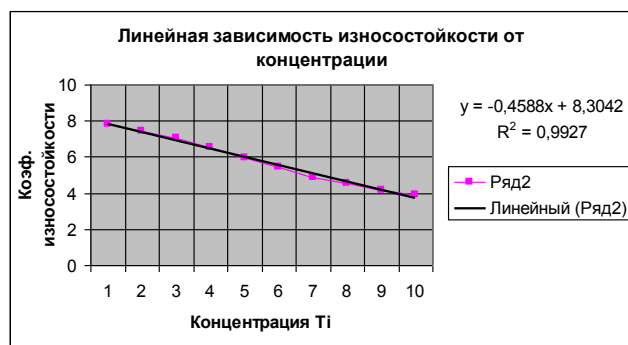
Марганец также влияет на износостойкость, но он ее понижает практически при всех концентрациях для сталей и чугунов

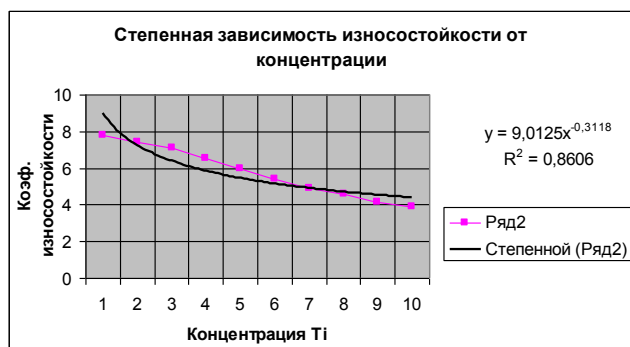
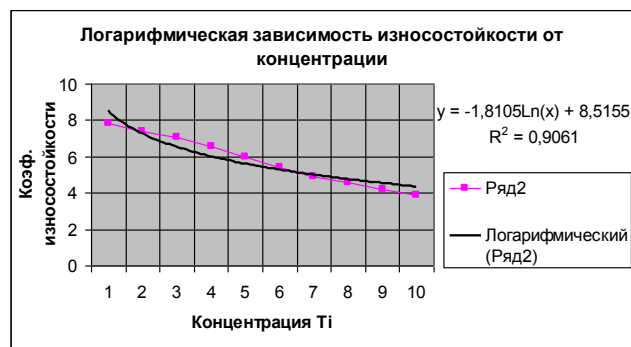
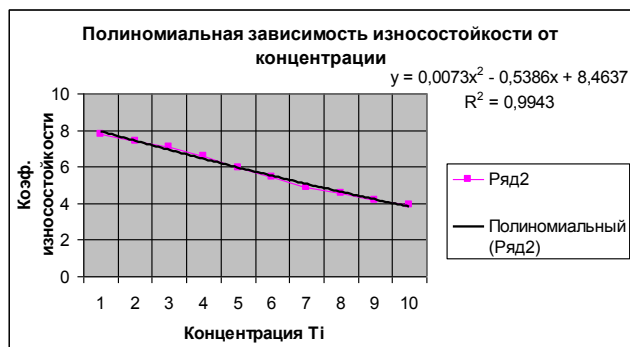
## 5. ХРОМ



Хром также повышает износостойкость

## 6. ТИТАН





$R$  – среднее квадратичное отклонение, характеризующее степенную приближенность функции к полученным данным (чем данный коэффициент выше, тем точнее описывается функция).

По выше представленным графикам видно, что максимально точное значение описывается при полиномиальной зависимости, где коэффициент  $R$  приближается к единице. Из всех графиков представленных выше видно, что только при борировании (коэффициент  $y$   $R=9982$ ), с увеличением концентрации, возрастает износостойкость.

Проведенный анализ позволяет нам установить легирование материала, которое целесообразно для насосов. Это могут быть как чугуны, так и стали из которых литьем можно изготавливать детали насосов. Конечно, для сохранения конструктивной прочности желательно, чтобы материал обладал не только хорошими литейными свойствами, но сочетанием прочности, пластичности и износостойкости при гидроабразивном изнашивании. Таким образом, наилучшим материалом будет литейная сталь с поверхностным упрочнением бором. 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 [126].

Для увеличения глубины борирования решено проводить борирование при литье, где температура достигает 1500°C. Повышение температуры процесса насыщения увеличивает диффузию и, следовательно, позволяет получить слой большей глубины и предположительно с твердостью свыше 1000 МПа (рисунок 29) [127].

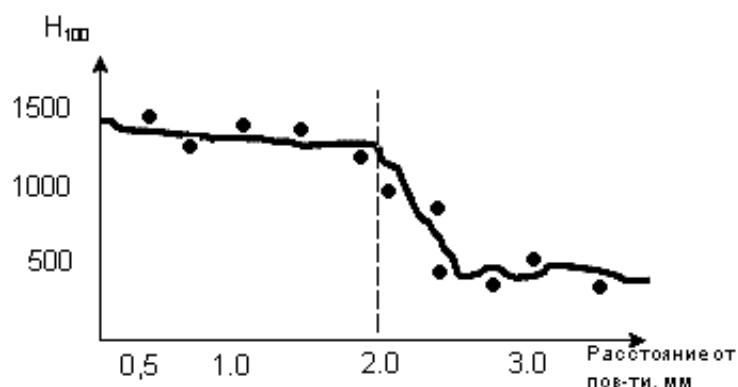


Рисунок 29. Зависимость твердости от глубины борированного слоя.

В результате экспериментов по разработке составов МЖК наилучшие результаты получены в системе: этилсиликат - дисперсный порошок карбида бора - специальные добавки. После чего форма заливалась.

МЖК в форму наносили вручную двумя, тремя слоями с последующей просушкой. После выбивки отливок они имели матово-серый оттенок, (рис.30). Поверхность не имела несплошностей (дефектов), что характерно для литья в земляные формы, рис.26.





### Рисунок 30. Рабочие колеса с модифицированной поверхностью

Исследования показали наличие борированного слоя с глубиной до 1,5-2мм. После отливки, на образцах измерялась микротвердость и изучалась микроструктура. Структурные неоднородности модифицированного слоя представлены на рисунке 31.

Результаты измерений микротвердости модифицированного слоя приведены в таблице 10.

Таблица 10. Микротвердость модифицированного слоя[127]

| Структурные составляющие                 | H <sub>100</sub>                                      |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Борированный слой                        | 1145,1315,1524,1315, 1145, 1315, 1005,1315, 1145 1315 |
| Темные участки внутри боридной эвтектики | 447,447, 508,586,508,447,508, 508                     |



Рисунок 31. Структурные неоднородности модифицированного слоя

Уровень износостойкости определяли на машине трения в условиях статической нагрузки 50кгс в условиях скольжения с частотой вращения 428об/мин.

Абразивная среда создавалась кварцевым песком, который подавался в зону трения. Согласно техническим характеристикам данного насоса, содержание механических примесей должно составлять не более 0,1 г/л. В результате же эксперимента содержание механических примесей было увеличено в пять раз до 0,5

г/л. Износостойкость рабочих колес после борирования оценивалась по величине убыли веса(рисунок32).

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

$$\Delta\sigma = \frac{0.76 \cdot 0.8 \cdot 1.5 \cdot 7 \cdot 0.08 \cdot 0.2 \cdot 48 \cdot 2.5^3 \cdot (1 - 0.6^2)}{0.3 \cdot 9.8 \cdot 3.14 \cdot 1 \cdot 1200} = 0,004 \text{ кг}$$

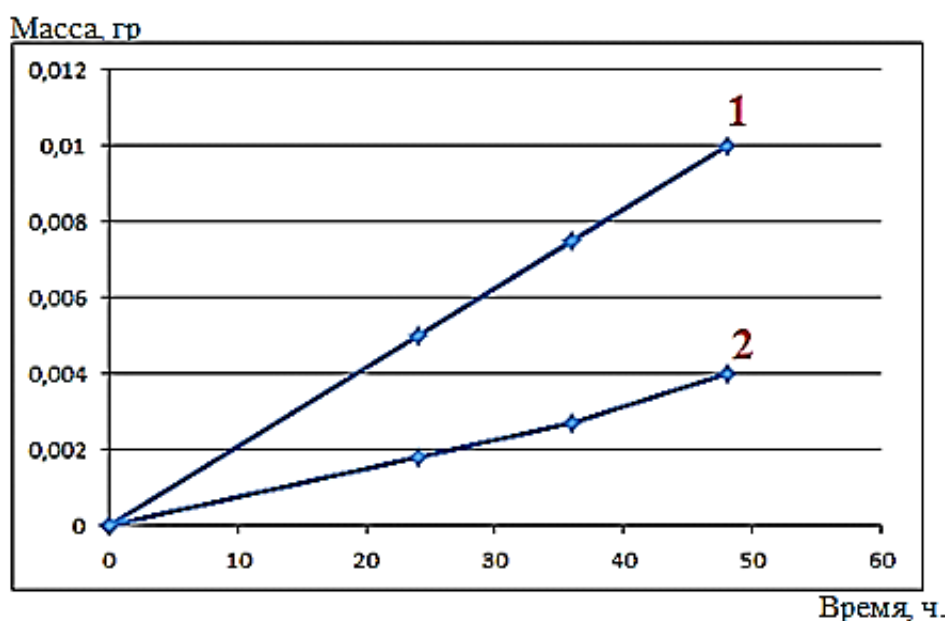


Рисунок 32. Массовый износ рабочих колес: 1- до процесса борирования, 2- после процесса борирования

Из приведенных данных видно, что метод борирования позволил уменьшить износ поверхности в 2,3 раза.

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 едином процессе выправляет параметркрупно-зернистости и д.р. дефектные структуры, получаемые обычно при

высокотемпературной ХТО и позволяет достичь заметного увеличения 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[127].

Для улучшения технологичности процесса нанесения МЖК, можно использовать поливинилбутиральный лак. В этом случае сушку форм можно проводить в камерных печах с газовым обогревом. Загрузка при температуре 150<sup>0</sup>С и повышение температуры до 300<sup>0</sup>С, охлаждение при закрытых дверях печи.

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.

**Разработана экономичная энергосберегающая технология модифицирования рабочих колес на основе использования литейной формы и тепловой энергии расплава при отливке в форму для создания модифицирующего слоя с заданными характеристиками износостойкости.**

#### **2.4.9. Некоторые предпосылки анализа процессов структуро- и фазообразования при модифицировании поверхности рабочих колес**

Управление структурой и свойствами материалов возможно в результате глубокого понимания процессов формирования структуры материала на всех стадиях его формирования и эксплуатации[31-33].

В этом смысле очевидный интерес представляет анализ процессов структуро- и фазообразования при модифицировании поверхности рабочих колес.

Здесь мы укажем лишь на некоторые важные моменты этих процессов.

Температурный режим внутренней стороны литейной формы во время заливки и остывания расплава чугуна представляет собой, рис.33.

Можно выделить две фазы – максимально быстрый нагрев до температуры около 1400 °С, с последующим медленным охлаждением.

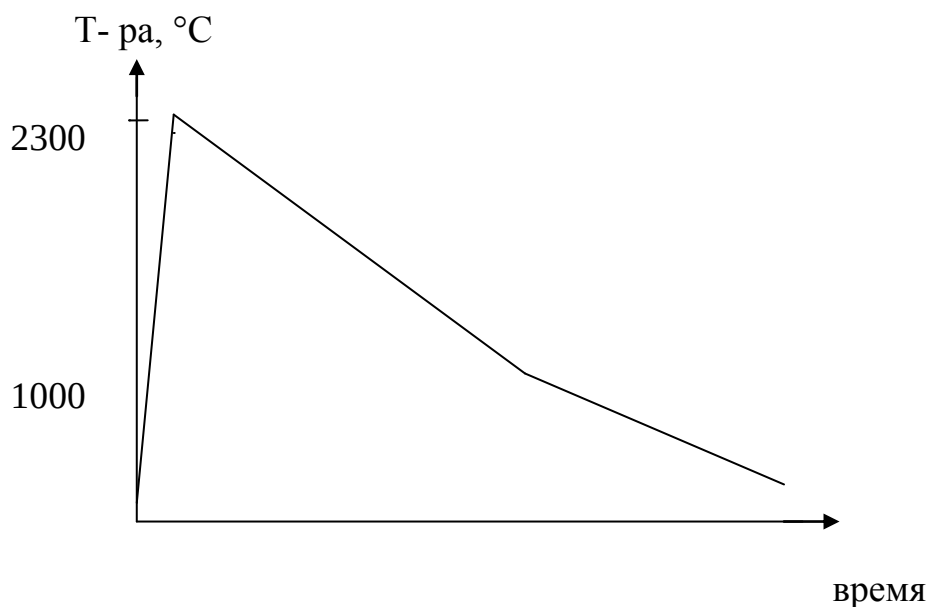


Рисунок 33. Температурный профиль внутренней стороны литейной формы во время заливки и остывания расплава чугуна

Литейно-земляная форма остывает медленнее, поэтому процессы диффузии идут, но с меньшей скоростью.

Этилсиликат при этом с высокой степенью вероятности превращается в кварцевое стекло, которое при температуре выше 1050°C представляет собой псевдожидкость, вязкость которой быстро падает с ростом температуры [34,35]. Это значит, что кварцевое стекло при температурах заливки расплава растекается по поверхности рабочего колеса. Мы полагаем, что именно кварцевое стекло создает основные полезные свойства модифицированного слоя.

Относительно роли карбида бора. Он имеет большую химическую стойкость во многих агрессивных средах (не контактирует с кислотами, и в тоже время разлагается щелочами). Карбид бора – высоко-абразивный тугоплавкий материал с температурой плавления 2300°C. Данный продукт функционирует до температуры 1000°C, а по твердости карбид бора опережает электрокорунд, карбид кремния SiC. По показателям твердости карбид бора третий после алмаза и кубонитрида бора.

Можно ожидать, что карбид бора в условиях пиковых температур диссоциирует и сохранит свою морфологию и структуру.

В этом случае основные элементы структуры модифицированного слоя - кварцевое стекло и дисперсные частицы карбида бора, распределенные в кварцевой матрице и способствующие устранению хрупкости кварцевого стекла.

Такова первоначальная модель структуры модифицированного слоя. Сам процесс создания этого слоя правильнее было бы назвать не борированием, а силицированием с дисперсным упрочнением карбидом бора.

Эти положения должны рассматриваться как предварительные, и подлежащие детальной проработке на основании инструментального исследования структуры и состава материалов.

#### **Выводы по разделу 2.4.**

**1. Разработана экономичная энергосберегающая технология модифицирования рабочих колес на основе использования литейной формы и тепловой энергии расплава при отливке в форму для создания модифицирующего слоя с заданными характеристиками износостойкости.**

**2. Разработана первоначальная модель структуры модифицированного слоя: основные элементы структуры модифицированного слоя - кварцевое стекло и дисперсные частицы карбида бора, распределенные в кварцевой матрице и способствующие устранению хрупкости кварцевого стекла.**

#### **2.5. Выводы по главе 2**

**1. Установлено, что для изготовления колес можно использовать легированный чугун с дополнительными микроструктурами и модифицированием.**

**2. Наиболее целесообразно является получение упрочненного слоя борированием при литье.**

**3. Разработана первоначальная модель структуры модифицированного слоя: основные элементы структуры модифицированного слоя - кварцевое**

стекло и дисперсные частицы карбида бора, распределенные в кварцевой матрице и способствующие устранению хрупкости кварцевого стекла.

**4. Разработана экономичная энергосберегающая технология модифицирования рабочих колес на основе использования литейной формы и тепловой энергии расплава при отливке в форму для создания модифицирующего слоя с заданными характеристиками износостойкости.**

### **ТРЕТЬЯ ГЛАВА**

**Анализ методов объемного упрочнения материалов и отработка технологии объемного упрочнения рабочих колес по методу магнитно-импульсной обработки**

**3.1.Актуальность применения методов комплексного упрочнения деталей – обработки поверхности и объема - для рабочих колес**

Получение упрочненного слоя методом борирования может быть усовершенствованно при использовании магнитно-импульсной обработки (МИО).

Скважинный погружной насос центробежного типа, вобычном исполнении, предназначен для откачки жидкостей из скважин:

- с содержанием воды до 99%;
- при этом механических примесей в откачиваемой жидкости должно быть не более 0,01 массовых % (или 0,1 г/л), а твердость механических примесей не должна превышать 5 единиц по шкале Мооса (баллов по Моосу);
- содержание сероводорода не более 0,001%.

Большое значение имеет водородный показатель попутной воды. Этот параметр составляет от 5.0 до 8.5 при обычных режимах и 3.0 до 9.0 в более сложных условиях. Необходимо отметить, что при рН от 3.0 до 5.0 в составе воды имеется высокая концентрация водородных ионов, т. е. вода характеризуется сильной

кислотной реакцией, что очевидным образом сказывается активизации процессов коррозии колеса и имеет ряд других последствий.

В соответствии с характеристиками заводов производителей, содержание свободного газа на входе насоса не должно превышать 25%.

Насос в коррозионностойком исполнении предназначен для работы с содержанием в пластовой жидкости сероводорода до 0,125% (до 1,25 г/л).

Исполнение в износостойком исполнении, позволяет откачивать жидкость с содержанием примесей до 0,5 г/л.

Таким образом, среда, с которой взаимодействует насос, может быть охарактеризована как гетерогенная многокомпонентная система сложного состава на основе водных растворов, нефти, твердых и газообразных компонентов.

Мы полагаем, что при столь широком разнообразии составов скважинной жидкости перспективной является идея об использовании нескольких типов рабочих колес:

- комплексно упрочненные (КУ) - с модифицированной поверхностью и с объемным упрочнением;
- с модифицированной поверхностью (МП) без объемного упрочнения;
- с объемным упрочнением (ОУ) без модификации поверхности.

КУ – рабочие колеса могут быть применены для наиболее нагруженных случаев; МП - рабочие колеса – для абразивных сред при умеренных механических нагрузках; ОУ - рабочие колеса - для неабразивных сред при повышенных механических нагрузках.

В данной главе рассматриваются вопросы создания комплексного упрочнения (КУ) рабочих колес и объемное упрочнение (ОУ) рабочих колес.

Свойства высокопрочного чугуна в значительной степени зависят от структуры и состава материала. Так, рабочие колеса из аустенидного чугуна с шаровидным графитом, по сравнению с пластинчатым, имеют более высокий уровень относительной износостойкости при гидроабразивном износе (п. 2.2.2.). Существенно отметить, что в данном случае речь идет об объемных областях материала.

Из этого следует, что, применяя определенные методы воздействия на структуру чугуна, можно оптимизировать его свойства.

**Таким образом, с учетом широкого разнообразия составов скважинной жидкости перспективной является идея об использовании нескольких типов рабочих колес;**

- комплексно упрочненные (КУ) - с модифицированной поверхностью и с объемным упрочнением;**
- с модифицированной поверхностью (МП) без объемного упрочнения;**
- с объемным упрочнением (ОУ) без модификации поверхности**

### **3.2. Анализ методов объемного упрочнения материалов с целью выбора оптимального решения для рабочих колес**

Методы объемного упрочнения основаны на таких способах воздействия на структуру и свойства материалов, при которых достигается значимый эффект в улучшении некоторых характеристик материала. Способы воздействия – термические, механические, электромагнитные и др.[1-5]. Достижимый эффект – повышение прочности, температуры эксплуатации, срока службы, устойчивости к воздействию агрессивных сред и др. При выборе оптимального метода объемного упрочнения материала необходимо учитывать множество факторов – исходное состояние материала (структура, свойства), возможность получения такой структуры материала, которая обеспечивала бы требуемые служебные характеристики; физические размеры материала (детали); экономические аспекты и пр.

#### **3.2.1. Метод упрочняющей термоциклической обработки**

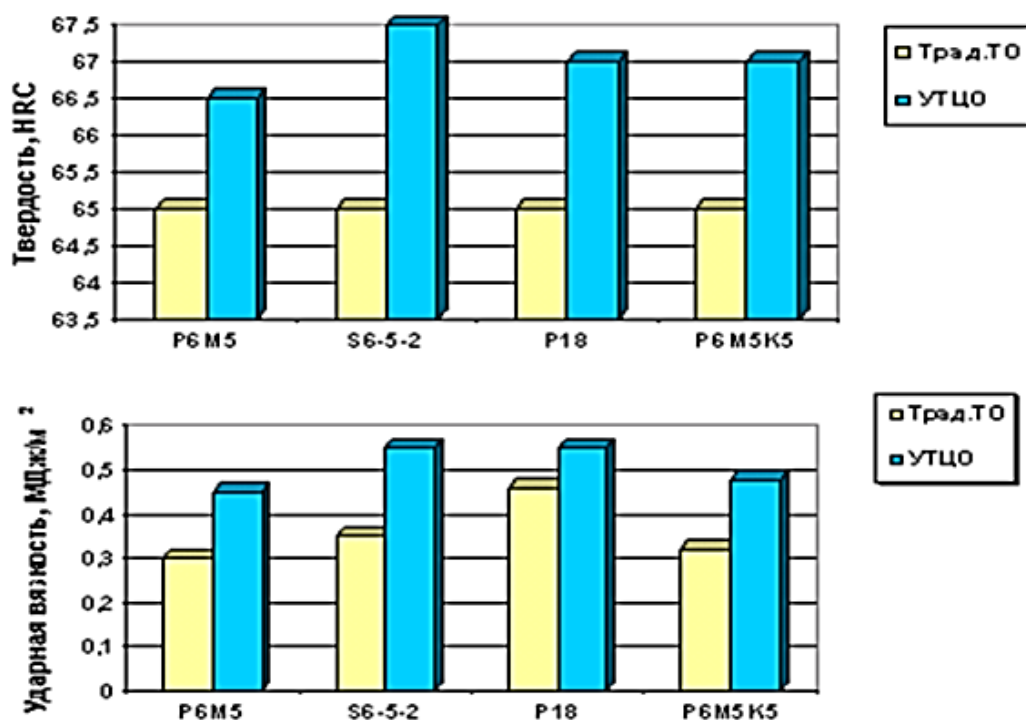
В комбинированных способах упрочнения инструмента и деталей машин доминируют поверхностные методы, тогда как объемные упрочняющие технологии [11- 14] еще не получили широкого распространения.

Значительный интерес представляют методы химико-термоциклической обработки (ХТЦО) стального инструмента и изделий[15-17], в которых поверхностный метод упрочнения - диффузионное насыщение стали углеродом,



бором и др. элементами, сочетается с объемными технологиями термоциклической термообработкой. В работе [18] описаны технологические процессы упрочнения инструмента: для объемного упрочнения – (1) упрочняющая термоциклическая обработка (УТЦО), а для поверхностного упрочнения – (2) низкотемпературная наногидрохимическая обработка (НГХО). При комбинировании этих процессов открываются большие возможности практического применения. Сравнительные данные по твердости, ударной вязкости, прочности на изгиб и износостойкости концевых фрез из быстрорежущих сталей S6-5-2, P6M5, P18, P6M5K5, подвергнутых традиционной термообработке (Трад.ТО) и упрочняющей термоциклической термообработке (УТЦО) с двумя термоциклами, рисунок 34.

На основании полученных данных следует отметить, что применение УТЦО с двумя термоциклами для различных быстрорежущих сталей приводит к одновременному повышению ударной вязкости быстрорежущих сталей в 1,5-1,7 раза, прочности на изгиб на 10-15% и поверхностной твердости на HRC 1,5-2,5 выше, по сравнению с традиционной термообработкой.



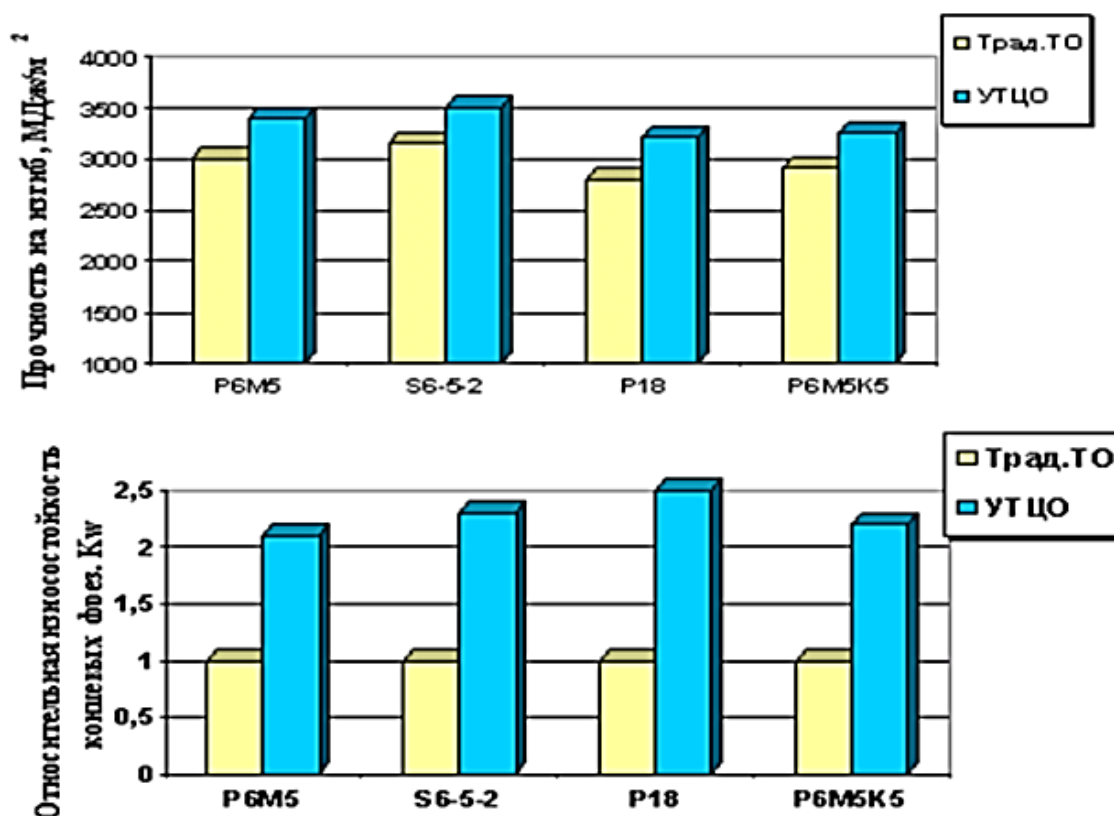


Рисунок 34. Сравнительные свойства термически упрочненных быстрорежущих сталей

### 3.2.2. Метод объемно-поверхностной закалки литых деталей

Метод объемно-поверхностной закалки относится к группе термических методов и используется, в частности, для повышения эксплуатационного ресурса литых деталей подвижного состава, работающих при действии циклических нагрузок и подвергаемых в эксплуатации интенсивному износу[19-21]..

Для обеспечения высокой циклической долговечности, высокой износостойкости, снижения чувствительности к концентраторам напряжений необходимо создать в упрочняемом сечении литой детали из низкоуглеродистой стали градиент свойств, предусматривающий наличие твердой износостойкой поверхности, вязкой, но прочной сердцевины и сжимающих напряжений в поверхностном слое. Для достижения такого комплекса свойств применяется метод объемно-поверхностной закалки.

Принцип метода объемно-поверхностной закалки заключается в использовании регулируемой термообработки (прокаливаемости) стали для получения эффекта поверхностного упрочнения деталей при одновременном повышении прочности глубинных слоев и сердцевины изделий.

Основными особенностями метода объемно-поверхностной закалки являются следующие положения:

1. Детали изготавливаются из сталей, режим термообработки которых согласован с размерами их нагруженных элементов, либо всего сечения. При необходимости увеличения толщины закаленного слоя в деталях до требуемого уровня используют легирование (не более 1 %) недорогими и недефицитными элементами, как кремний, марганец и хром.

2. Детали при закалке нагреваются насквозь или достаточно глубоко с тем, чтобы глубина нагрева до надкритических температур превышала необходимую глубину упрочненного слоя не менее, чем в два раза.

3. При объемно-поверхностной закалке используется интенсивное закалочное охлаждение направленным быстродвижущимся потоком воды или душем, позволяющее в максимальной степени реализовать способность среднеуглеродистых и низколегированных сталей к упрочнению.

4. Для низкоуглеродистых сталей требуемый уровень свойств достигается за один цикл нагрева и охлаждения. Операция отпуска с дополнительным печным нагревом не производится.

В методе объемно-поверхностной закалки за один технологический цикл нагрева и охлаждения достигается поверхностная закалка на заданную глубину и максимальную твердость, уровень которой зависит главным образом от содержания углерода в стали, и упрочнение глубинных слоев и сердцевины деталей на структуру тонкой феррито-цементитной смеси (сорбита или троостосорбита закалки). Такое сочетание обеспечивает высокий уровень механических свойств изделий при разнообразных наиболее характерных видах нагружения деталей в эксплуатации.

Влияние объемно-поверхностной закалки на основные технические и эксплуатационные характеристики изделий состоит в следующем:

#### А. Повышение износостойкости.

Наиболее типичным и опасным видом износа для деталей железнодорожного транспорта является износ при контакте металлических поверхностей в присутствии частиц естественного абразива. Основным фактором повышения износостойкости в этих условиях является увеличение твердости материала, желательно до уровня, превышающего твердость абразива.

#### Б. Изменение микроструктуры и свойств.

Для наиболее нагруженных поверхностных слоев деталей после объемно-поверхностной закалки поверхностный слой, закаленный на мартенсит, в зависимости от содержания углерода, имеет твердость 56-63 HRC, временное сопротивление разрыву 2200-2600 МПа, относительное сужение 15-30 %, коэффициент интенсивности напряжения (вязкость разрушения)  $K_{Ic}=1600-2700$  Н/мм<sup>3/2</sup> при 0,4 - 1,0%С, соответственно.

Свойства, достигаемые в сердцевине изделий из обычных углеродистых сталей после объемно-поверхностной закалки, находятся на уровне свойств деталей из легированных сталей, подвергнутых цементации, закалке и низкому отпуску.

Упрочненный поверхностный закаленный слой находится в высокопрочном состоянии, а сердцевина имеет запас вязкости, что позволяет детали, подвергнутые ОПЗ, эксплуатировать при более высоких нагрузках, чем детали после цементации или объемной закалки с отпуском.

Важнейшим фактором повышения конструктивной прочности изделий после объемно-поверхностной закалки является создание в поверхностных слоях высоких остаточных сжимающих напряжений, обеспечивающих их высокую циклическую долговечность. Так предел выносливости внутренних колец подшипника из стали ШХ4 после ОПЗ увеличивается в полтора раза.

Существенное преимущество деталей после объемно-поверхностной закалки в сравнении с другими видами упрочнения (объемная закалка и отпуск, улучшение) выявлено и по результатам динамических испытаний.

Серийной технологией упрочнения литых деталей подвижного состава является объемная закалка в спокойную воду с последующим отпуском. Предлагаемая технология объемно-поверхностной закалки быстродвижущимся потоком воды обладает рядом преимуществ по сравнению с серийной технологией:

Значительно более интенсивное охлаждение потоком воды в сравнении со спокойной водой обеспечивает максимальную реализацию способности низкоуглеродистых сталей типа 20ГЛ к упрочнению, т.е. повышает глубину и твердость упрочненного слоя без дополнительного легирования.

Применение такой технологии для литых деталей подвижного состава из сталей типа 20ГЛ не требует проведения технологической операции отпуска, т.к. необходимые прочность, твердость и микроструктура упрочненного слоя формируются под воздействием процессов интенсивного охлаждения и процессов самоотпуска, регулировать которые позволяет изменение скорости охлаждения. Отсутствие операции отпуска позволит экономить электроэнергию и сократить соответствующие затраты.

Охлаждение быстродвижущимся потоком воды в отличие от закалки в спокойную воду приводит к возникновению внутренних остаточных напряжений сжатия за счет образования градиента свойств по сечению детали. Сжимающие напряжения в поверхностных слоях изделия положительно влияют на его циклическую долговечность и стойкость к концентраторам напряжения.

Таким образом, метод объемно-поверхностной закалки представляет собой эффективный способ упрочнения как поверхностных, так и внутренних областей стальных литых деталей подвижного состава. Вместе с тем, распространение указанной технологии для упрочнения чугунных рабочих колес представляется маловероятным. Принципиальный недостаток термических методов как основы технологии объемного упрочнения материалов состоит в том, что нагрев и охлаждение деталей происходит неравномерно – поверхностные области детали быстро нагреваются и охлаждаются, тогда как для внутренних зон характерно медленное протекание тепловых процессов.

Таким образом, при использовании термических методах изначально закладываются условия для неоднородности - структурной и свойств. Чтобы сгладить эти недостатки необходимо применять такие температурные режимы, которые были бы подобраны под деталь с определенными физическими размерами.

### **3.2.3. Группа методов электромагнитного воздействия**

В группу методов электромагнитного воздействия могут быть отнесены такие способы обработки материалов, которые основаны на эффектах взаимодействия электромагнитного поля в различных вариантах и вещества. Наиболее известные методы из этой группы – лазерные[22-25], магнитные [26-30], магнито – импульсная обработка [31-33] и др. способы. Указанные методы в последние годы находят все более широкое применение, вытесняя до некоторой степени традиционные технологии обработки металлов – деформационные и термические. Преимущества методов электромагнитного воздействия перед традиционными технологиями состоит в том, что в случае использования электромагнитного метода существует очень широкий спектр регулируемых параметров воздействия – частоты, интенсивности излучения и др. параметры. Кроме того, проблемы неоднородности - структурной и свойств материалов, значимые в случае термических технологий, при использовании электромагнитных методов могут быть успешно решены регулированием параметров излучения.

Следует заметить, что электромагнитные методы как упрочняющие технологии находятся на начальном этапе развития, однако ряд тенденций в развитии этих технологий можно проследить на примере лазерной обработки.

#### **3.2.3.1. Лазерные методы упрочнения.**

При лазерной обработке стали учитываются закономерности структурных превращений различных сталей и сплавов в зоне термического воздействия при лазерной обработке, а также изучаются принципы и формулируются критерии оптимизации режимов лазерной закалки.

При лазерной закалке стали так же, как и при других видах быстрого нагрева, кинетика  $\alpha \rightarrow \gamma$  с преобразованием диффузией углерода, что сводится к потребности ввести понятие сдвиг критических точек температуры фазового перехода.

### *Изучение микроструктуры и свойства сталей и чугунов в зоне лазерной обработки.*

Значения температуры поверхности чугунов и сталей должны быть постоянными и близкими к  $T_{пл}$ , поэтому появилась возможность оценить длительное воздействие  $\tau$  излучения на структуру и твердость чугуна и стали, что представляется важным с точки зрения оптимизации технологического процесса закалки без оплавления поверхности. Так, при изменении  $\tau$  для чугуна СЧ21 в границах от 0,16 до 1,2 сек., скорость охлаждения нагретого объема металла превышает критическую скорость закалки, о чем свидетельствует характер полученных в зоне лазерного воздействия структур и их твердость, рис. 8.

На соотношение аустенитной и мартенситной составляющих в чугуне СЧ21 в структуре зоны лазерного воздействия существенное влияние оказывает длительность воздействия излучения. С увеличением  $\tau$  в приповерхностном слое и в глубине зоны лазерного воздействия появляются отдельные участки остаточного аустенита с микротвердостью  $H_{100} = 500—560$  кгс/мм<sup>2</sup>. В глубинных областях в зоне лазерного воздействия аустенит локализуется вокруг включений фосфидной эвтектики, т.е. в наиболее обогащенных углеродом участках. Структурная неоднородность по глубине зоны лазерного воздействия, которая возникает при увеличении  $\tau$ , сопровождается неравномерным распределением твердости. Видимый рост количества остаточного аустенита с ростом  $\tau$ , по-видимому, связано с большим насыщением твердого раствора углеродом. На кривой микротвердости, в соответствии с рисунком 35, имеются «провалы», связанные с попаданием индентора, прибора ПМТ-3, на аустенитный участок. Выбор режимов закалки чугуна СЧ21 и соответствующего ему структурного состояния в ЗЛВ должен производиться с учетом условий эксплуатации конкретной детали, так как аустенит может оказывать различное влияние на износостойкость

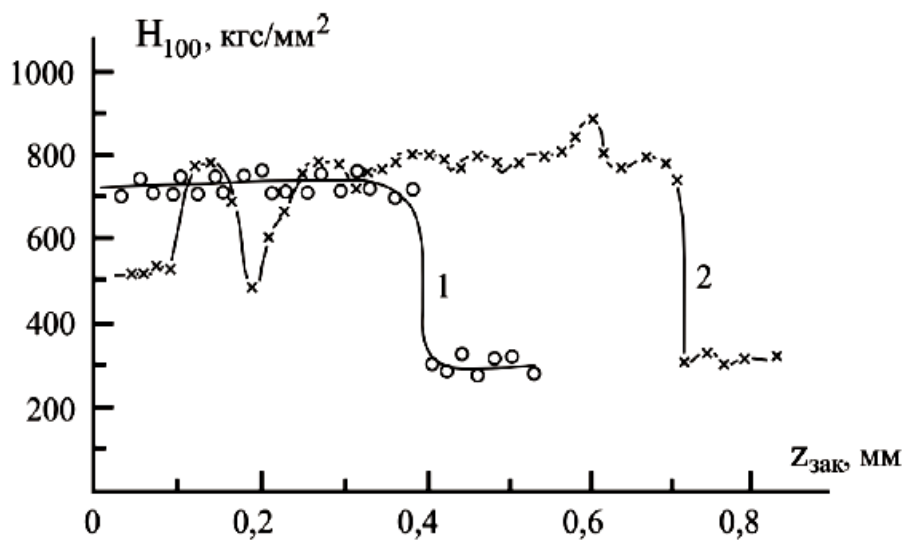


Рисунок 35. Распределение микро-твердости по глубине. Зоны воздействия лазера в чугуне СЧ21 при длительности воздействия при  $\tau = 0,16$  с - (1), и  $\tau = 1,2$  с - (2).

Применение лазерной технологии для улучшения качества рабочих поверхностей штампового инструмента. Результаты многочисленных работ в области лазерной модификации поверхности показали целесообразность проведения исследований по разработки конкретных технологий лазерной обработки кузнечно-прессового инструмента. Штампы имеют довольно сложные геометрические формы, поэтому использовали 5-и координатный стол-манипулятор, позволяющий практически перекрыть весь спектр геометрических форм обрабатываемых штампов.

### 3.3. Метод магнитно-импульсного упрочнения – технология и аппаратура

Технология магнитно-импульсной обработки металлов в последние годы находит все большее применение в силу высокой эффективности, а также простоты и экономичности применяемых установок. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что перемангничивание полем высокой напряженности способствует увеличению твердости, повышению прочности и долговечности обрабатываемых заготовок.

Зависимость механических свойств от режимов магнитно-импульсной обработки связана с преобразованием структуры металлов. Вопросы взаимодействия электромагнитного поля с металлами рассмотрены в [39].



## Анализ взаимодействия внешнего электромагнитного поля с проводящими средами

К основным факторам, определяющим воздействие магнитно-импульсной обработки (МИО) на металлические материалы, относятся [40]:

- непосредственное магнитное воздействие (намагничивание, переманчивание, магнитострикция);

- джоулево тепловыделение;

- силовое воздействие магнитного поля на индуцированный электрический ток;

- ток проводимости, индуцированный переменной во времени составляющей магнитного поля;

- упругие и пластические деформации

- электроннопластический эффект, обусловленный движением электронов и их взаимодействием с дислокациями, вызывающий снижение сопротивления деформированию и повышение пластичности металлов;

Для общего случая падения плоской волны на плоскую поверхность металла значения напряженностей электрического  $E_x$  и магнитного  $H_x$  полей, соответственно, имеют вид:

$$E_x = E_0 \exp \left[ -\frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left( 2\pi f t - \frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right),$$
$$H_x = H_0 \exp \left[ -\frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} \right] \cos \left( 2\pi f t - \frac{2\pi x}{c \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} - \frac{\pi}{4} \right),$$

где  $E_0$  и  $H_0$  — значения напряженностей электрического и магнитного полей на поверхности металла,  $c$  — скорость света,  $\mu$  — магнитная проницаемость,  $\rho$  — удельное электросопротивление,  $f$  — частота колебаний,  $t$  — время,  $x$  — расстояние от поверхности в глубь металла.

При проникновении плоской электромагнитной волны в металл, рис. 9 уменьшается амплитуда напряженности электрического и магнитного полей;

меняются фазы колебаний; фаза магнитного поля отстает от фазы электрического поля на  $\pi/4$ . С переходом к глубинным слоям металла количество поглощенной энергии убывает:

$$\frac{4\pi}{c\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}} = \frac{2}{d},$$

где  $d$  — глубина проникновения магнитного поля в металл.

В слое  $x=d$  поглощается 86,5% всей энергии, переданной в металл.

Величина  $d$  зависит от констант материала и частоты электромагнитных колебаний  $f$ , что показано в табл. 1. Оценка воздействия импульса магнитного поля на тонкую проводящую пластину перпендикулярно ее поверхности дана в [40].

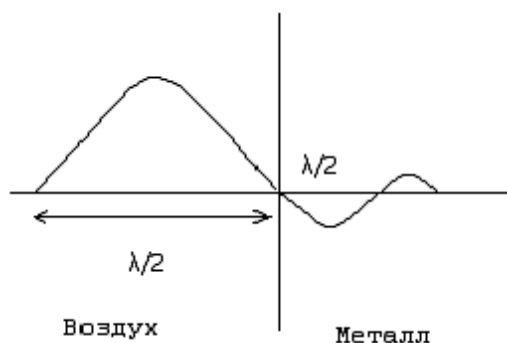


Рисунок 36. Схема проникновения плоской электромагнитной волны в металл

| Частота, Гц      | Глубина проникновения в медь $d$ , мм |
|------------------|---------------------------------------|
| $10^8$           | 0,007                                 |
| $10^6$           | 0,67                                  |
| $10^5$           | 0,21                                  |
| $10^4$           | 0,67                                  |
| $2 \cdot 10^3$   | 1,5                                   |
| $0,5 \cdot 10^2$ | 9,5                                   |

Таблица 11. Зависимость глубины проникновения излучения в медь от частоты электромагнитного поля

Для медного образца при времени импульса  $10^{-4}$  с и индукции 1 Тл приращение температуры составляет порядка 20 К, давления  $\sim 15$  МПа; плотность тока—

$6 \cdot 10^3 \text{ А/мм}^2$ . Силовое воздействие в данном случае достаточно эффективно для того, чтобы вызвать структурные изменения [41], но не достигает пределов упругости и прочности. Плотность тока достаточна для достижения электроннопластического эффекта [42].

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

Если отсутствует видимая деформация, то можно считать, что упрочнение внутренних слоев обусловлено в первую очередь распространением ударной волны. Для меди М1 зависимость микротвердости от глубины исследуемого слоя  $x$  представлена на рисунок 37а.

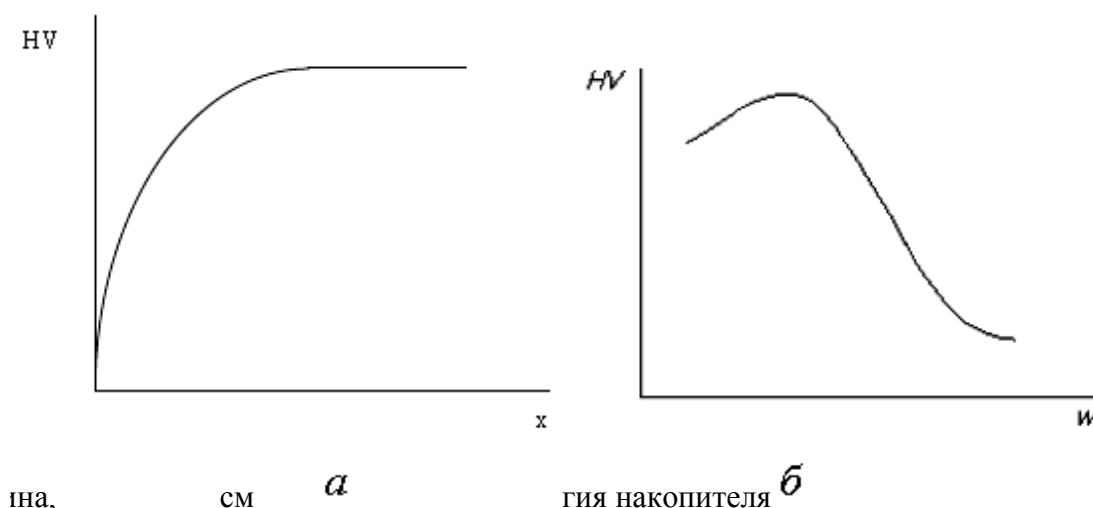


Рисунок 37. Зависимость микротвердости от глубины слоя (а) и энергии емкостного накопителя (б).

Эффект упрочнения с увеличением расстояния от поверхности возрастает. Причем дополнительное упрочнение не зависит от величины исходного зерна и может быть связано либо с измельчением зерна, либо с изменением дислокационной структуры. Зависимость микротвердости от энергии емкостного накопителя  $w$  представлена на рисунок 37б.

Исследования производили на образцах, соответствующих техническим требованиям ГОСТ 3722-81.

### **Магнитно-импульсная обработка стальных шариков**

Для проведения обработки использовали установку, параметры которой представлены в таблице 12, а схема – на рисунке 38.[39].

Таблица 12 Параметры установки МИО

| Характеристики генератора и индуктора | Диапазон изменения |
|---------------------------------------|--------------------|
| Максимальная энергия импульса         | 20 кДж             |
| Длительность фронта импульса          | 20 мкс             |
| Максимальная амплитуда тока           | 16 кА              |
| Длительность импульса                 | 100 мкс            |

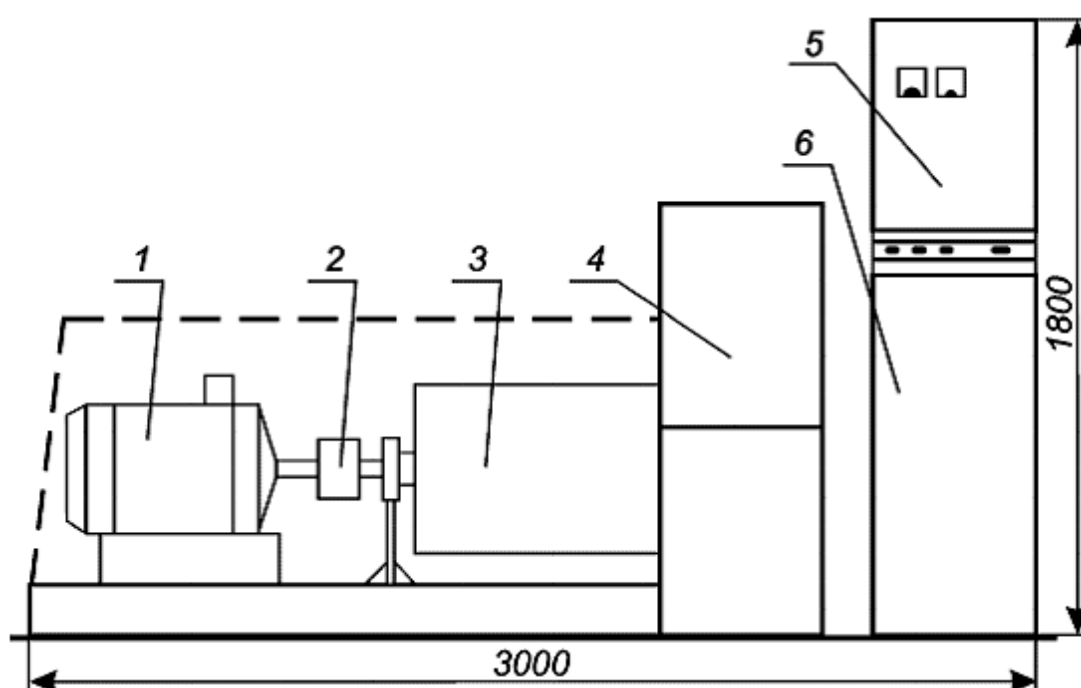
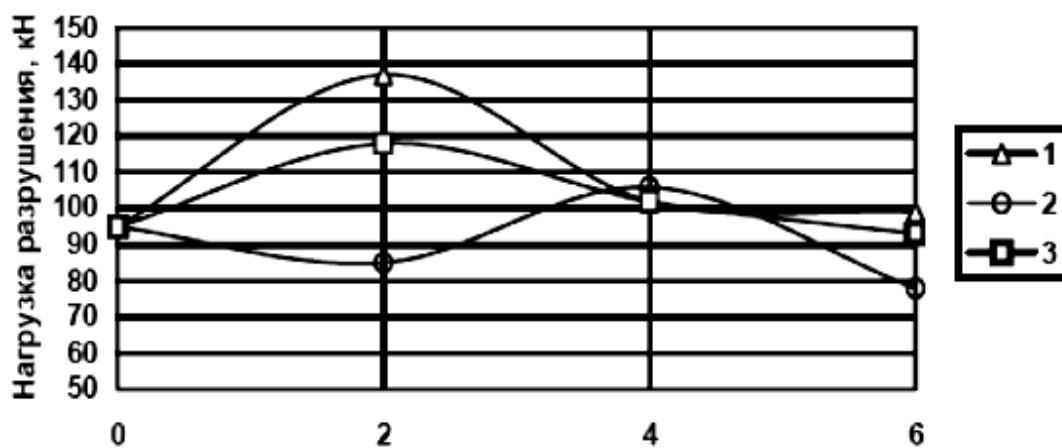


Рисунок 38. Установка для магнитно- импульсной обработки токопроводящих штучных заготовок: 1— двигатель; 2— муфта; 3—генератор импульсных токов; 4— стойка управления; 5— пульт управления; 6—технологический блок.

На термообработанных шариках (сталь ШХ15) проводили дополнительную обработку магнитно-импульсным методом. Испытания шариков на разрушение после их магнитно-импульсной обработки проводили на испытательной машине ЦДМ-100 по ГОСТ 3722-81. При проведении испытаний определяли нагрузку разрушения в кН по шкале В для различных режимов магнитно-импульсной обработки.

На рисунках 39, 40 показаны итоги определения усилия разрушения шариков после их обработки импульсным магнитным полем. Рисунок 39 иллюстрирует зависимость усилия разрушения от количества импульсов МИО, рис.40 — от энергии импульса. Наибольшее усилие разрушения показали шарики, обработанные по варианту: 2 кДж, 2 импульса.



Количество импульсов

Рисунок 39. Изменение усилия разрушения в зависимости от количества импульсов обработки:

1—2 кДж, 2— 3,75 кДж, 3— 5,8

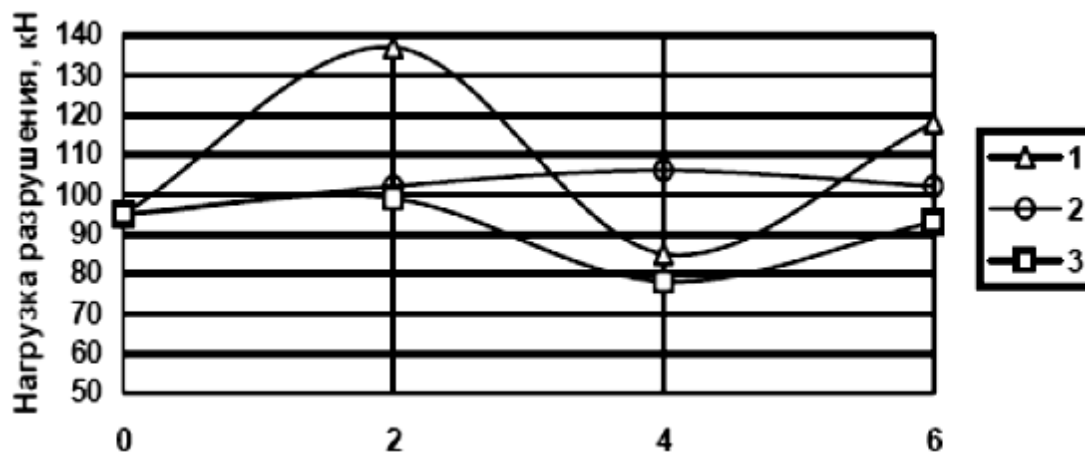


Рисунок 40. Изменение усилия разрушения в зависимости от энергии импульса:

1—2 импульса, 2-4 импульса,

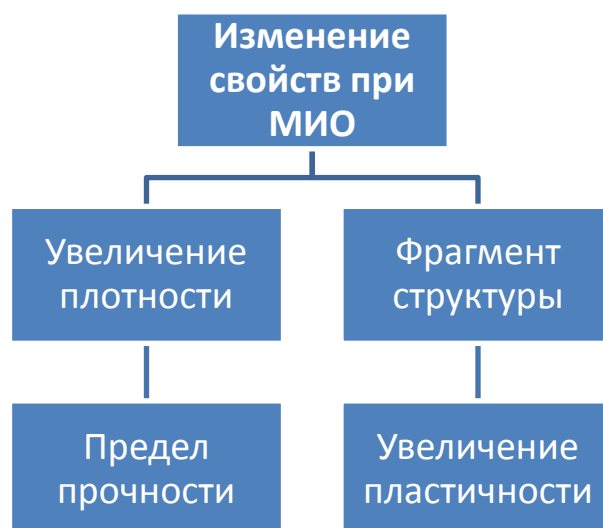
Полученные и проанализированные результаты обработки шариков импульсным магнитным полем показывают, что этот метод имеет большие возможности для решения поставленной задачи — повышения прочностных свойств шариков за счет оптимизации их структуры и свойств.

## **О некоторых особенностях структурных превращений в сталях при магнито - импульсной обработке.**

Магнито – импульсная обработка стали при определенных условиях может приводить к структурным превращениям, сопровождающимся в одних случаях - увеличением, а в других - потерей прочности [43].

Известно, что импульсная обработка позволяет дополнительно повысить твердость и прочность материалов, не упрочняемых термической обработкой [44,45]. Так, после импульсной обработки стали 08 ее твердость по Бринеллю (HB) повысилась с 1142 до 1550 МПа. У конструкционной стали 40Х твердость по Роквеллу (HRC) возросла с 32 до 36 единиц, а у инструментальной стали Х10СФЮТ - с 60 до 65 единиц.

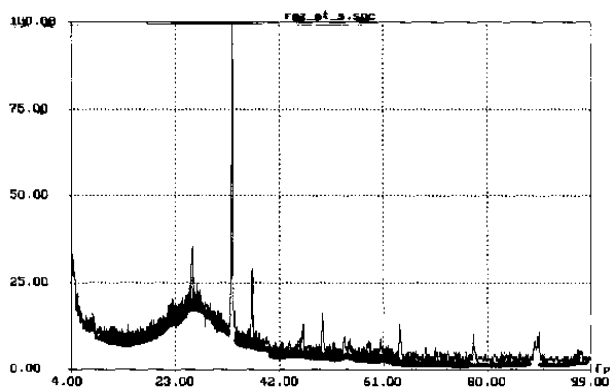
Эффект упрочнения металла в результате действия основной и отраженной ударных волн, причем эффект упрочнения нельзя объяснить только пластической деформацией металла, так как степень остаточной деформации при импульсном упрочнении значительно меньше, чем при упрочнении статическим деформированием. В ряде случаев упрочнение при импульсной обработке наблюдается даже при остаточной деформации, близкой к нулю.



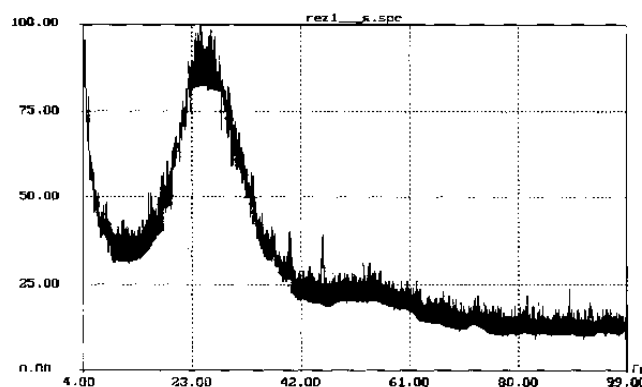
Магнито-импульсное воздействие может приводить к существенному измельчению зерна (в 2...3 раза), т.е. к повышению степени фрагментации структуры. При этом отмечается, что для новых зерен характерна зубчатость

границ, что может быть связано с разницей в локальной плотности дефектов по обе стороны границы зерен. Наличие зубчатости границ является признаком динамической рекристаллизации.

Рисунок 41. Теоретические данные после объемного упрочнения по методу МИО



**Исходное состояние**



**После МИО**

Таким образом, в результате МИО в сталях имеются структурные признаки двух процессов: высоко-скоростной сдвиг микро-пластической деформации по принципу двойникования и динамической рекристаллизации.

Уменьшение габаритов зерен карбидной фазы, увеличение ее площади и степени дисперсности в матрице стали привели к увеличению вязкости. Для инструментальных сталей доказано: после МИО площадь, занимаемая карбидной фазой, стала больше в полтора раза при одновременном измельчении карбидных включений в среднем от 1,44-1,15 мкм. Известно, что пластическая деформация способствует распаду цементита и переходу углерода в твердый раствор[46]. Отсюда следует, процесс микро-пластической деформации, протекает при импульсном упрочнении, способствует более интенсивному растворению карбидной фазы и перераспределению углерода в матрице.

Эффект увеличения пластичности обусловлен также:

- более равномерным и однородным протеканием деформации по всему объему обрабатываемой детали;

- высокоскоростным разогревом деформируемых объемов детали вихревыми токами до температур порядка 250...3500С, что ускоряет деформационные и диффузионные процессы;

- значительным снижением вероятности возникновения в металле скрытых дефектов типа внутренних нарушений сплошности.

Стабильность эффекта упрочнения зависит от частоты магнитных импульсов[44,45].

При не больших частотах, для данного типа кристаллической решетки материала, крупные комплексы атомов, лежащие в одной и той же кристаллографической плоскости, могут перейти на дальние энергетические уровни, и вызывать микро-пластическую деформацию. В итоге в материале возникает процесс фрагментации зерен аустенита, динамической рекристаллизации, существенно ускоряется диффузионный процесс, который вызывает измельчение карбидной фазы, увеличение и распределение плотности дефектов и в результате чего возникают неравновесные состояния материала, в виде проявления повышенной прочности и твердости и в тоже время с сохранением вязкости и пластичности.

С ростом интенсивности импульсов резонансные явления существенно уменьшаются, происходит фрагментация и несогласованное взаимодействие атомных комплексов, что приводит к их переходу на более нижние энергетические уровни. Рассмотренные ранее эффекты появляются в существенно уменьшенном варианте. В большинстве случаев проявляется эффект упрочнения, и разупрочнение сплава и их энергии.

Определенное ограничение магнито-импульсного метода связано с необходимостью подбора частоты импульсов, и в большинстве случаев с требованиями проведения предварительной обработки материала (предварительная закалка или пластическая деформация исходной детали) для получения в сталях, которые не упрочняются термо-обработкой, высокой концентрации дефектов и напряжений, для усиления эффектов упрочнения.



По мимоэтого, для легированных материалов необходим нагрев перед упрочнением или же в ходе самого процесса - для интенсификации диффузионных процессов и процесса микропластической деформации.

**Таким образом, технология магнитно-импульсной объемного упрочнения металлов в последние годы находит все большее применение в силу высокой эффективности, а также сравнительной простоты и экономичности применяемых установок.**

**Вместе с тем, магнито–импульсная обработка стали при определенных условиях может приводить к структурным превращениям, сопровождающимся в одних случаях - увеличением, а в других - потерей прочности**

### **3.4. Отработка технологии объемного упрочнения рабочих колес по методу магнитно-импульсной обработки**

Отработка технологии объемного упрочнения рабочих колес включала такие этапы, как, разработка аппаратного оформления и основных параметров магнитно-импульсной установки, а также отработка режимов упрочнения рабочих колес.

#### **3.4.1. Разработка аппаратного оформления и основных параметров магнитно-импульсной обработки**

Магнитно-импульсная установка представлена блок-схемой, рисунке 42. Установка включает генератор импульсных напряжений, пульт управления, зарядное устройство, конденсаторную батарею и тиристорный ключ.

При разряде конденсаторной батареи в соленоиде и расположенной в нем детали генерируется электромагнитное поле заданной напряженности и частоты.

Воздействие такого поля приводит к изменению структуры материала и, следовательно, его свойств.

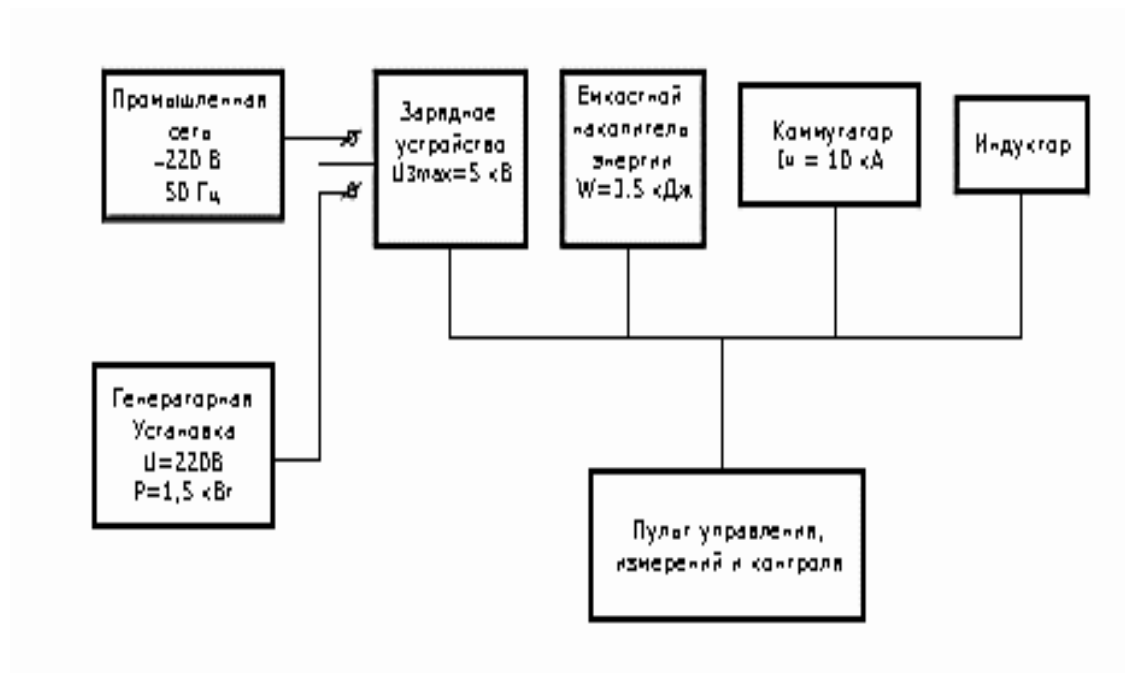


Рисунок 42. Принципиальная блок-схема электрической части магнитно- импульсной установки.

Магнитоприводы (индукторы) используемые для обработки могут быть как кольцевыми, так и плоскими. Для упрочнения колес мы применяли плоский индуктор.

### **Разработка основных параметров МИО при использовании плоских индукторов.**

Разработка основных параметров МИО имела целью повышение эффективности работы установки.

#### **1. Использование плоских индукторов для упрочнения колесных пар.**

Для упрочнения колесных пар наряду с кольцевыми индукторами целесообразным является использование плоских индукторов.

Плоские индукторы представляют собой стеклотекстолитовые плиты толщиной 20 мм с профрезерованными спиралеобразными пазами, в которые уложена и закреплена медная шина марки ПДСК-2,5×8 ребром к рабочей поверхности, концы обмоток соединены пайкой с болтами, обеспечивающими необходимый электрический контакт и прочность механического соединения. Корпуса индуктора с пазами и обмоткой залиты эпоксидной смолой.

Схема плоского индуктора приведена на рисунках 43 и 44.

Распределение магнитного поля на поверхности индуктора по осям (X, Y) и по оси Z над поверхностью индуктора проводятся с помощью измерителя импульсного магнитного поля.

2. Определение основных параметров МИО при использовании плоских индукторов.

При исследованиях распределения магнитного поля по указанным осям также проводится расчет величины максимального тока в индукторе:

$$I_m := k_p \cdot U_0 \cdot \sqrt{\frac{C_0}{L}}$$

где  $L$  – индуктивность разряженной цепи;  $U_0$  – напряжение заряда на конденсаторах;  $k_p$  – коэффициент, учитывающий омические потери в разрядной цепи.

Индуктивность исследуемого индуктора, измеренного с помощью прибора ИЦ Е7 – 8, составляет  $L_{\text{и}} = 15,4$  мкГн. Записывали осциллограмму тока в индукторе и осциллограмму напряженности магнитного поля на поверхности. Приведенные на рисунках 45 и 46 типичные осциллограммы энергетических параметров индуктора получены при разряде на него накопителя емкостью  $C_0 = 1600$  мкФ.

Используя данные осциллограмм, определяют ток в индукторе и

$$I_m := \frac{U_R}{R_{\text{ш}}} \quad K_p := \frac{I_m}{U} \cdot \sqrt{\frac{L_{\text{и}}}{C_0}}$$

Данные осциллограмм напряженности позволяют рассчитывать величину напряженности в центральной зоне индуктора

$$H_m := \frac{U_H}{K_{\text{ч}}}$$

где  $K_{\text{ч}} = 580$  МВ/Тл – чувствительность датчика холла.

Результаты испытаний по определению напряженности магнитного поля в индукторе приведены в таблицах 13 и 14:

Таблица 13

| X, см.  | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 45   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| H1, Тл. | 0,31 | 0,21 | 0,22 | 0,20 | ,016 | 0,15 | 0,12 | 0,06 | 0,03 |
| H2, Тл. | 0,10 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 |

Длинная сторона индуктора  $H_x(x)$ ;  $z = 0$ .

Таблица14

| X, см.  | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   | 30   | 35   | 45   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| H1, Тл. | 0,31 | 0,21 | 0,22 | 0,20 | 0,16 | 0,15 | 0,12 | 0,06 | 0,03 |
| H2, Тл. | 0,10 | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 |

Короткая сторона индуктора  $H_y(y)$ ;  $z = 0$ .

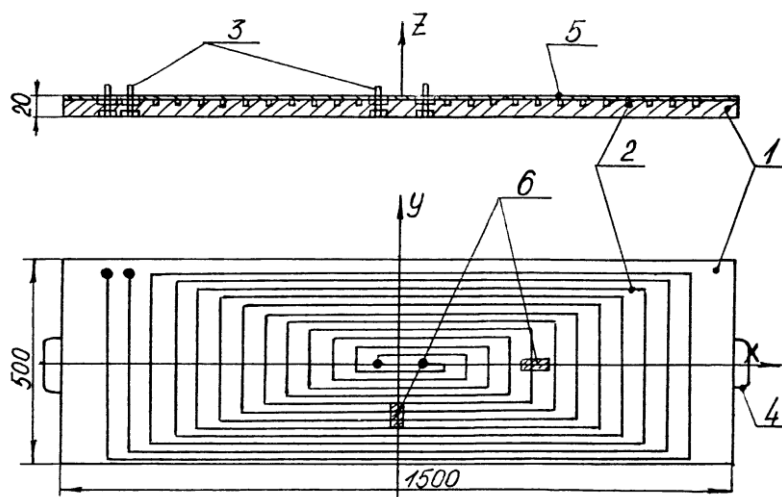


Рисунок 43. а)Плоский индуктор № 1.

1 – корпус; 2 – паз с обмоткой; 3 – вывод обмотки; 4 – ручка; 5 – крышка; 6 – датчик Холла

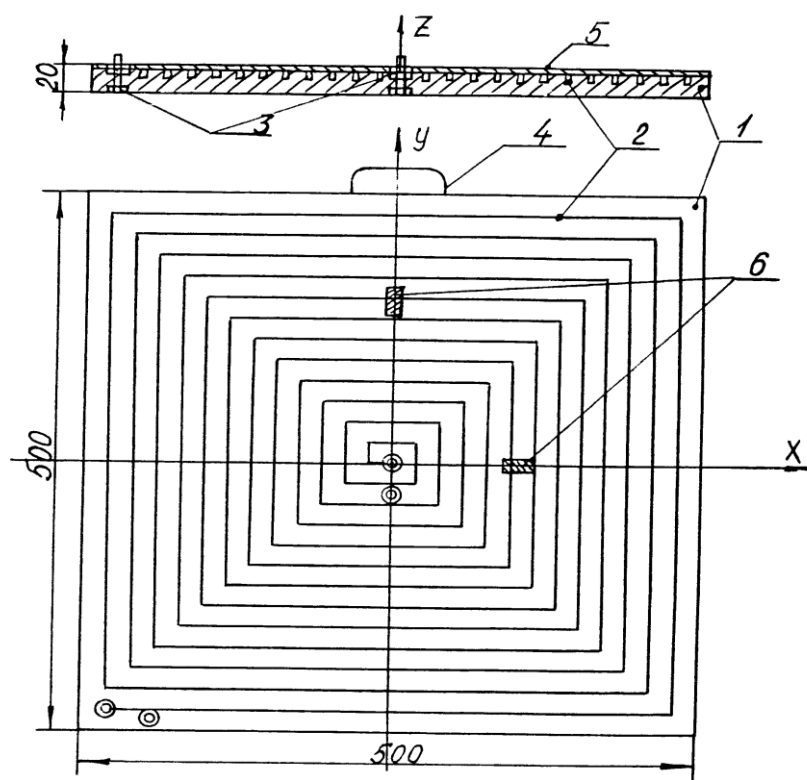


Рисунок 44. б) Плоский индуктор № 2.

1 – корпус индуктора; 2 – пазы с обмоткой; 3 – выводы обмоток;  
4 – ручки; 5 – крышка; 7 – датчик Холла.

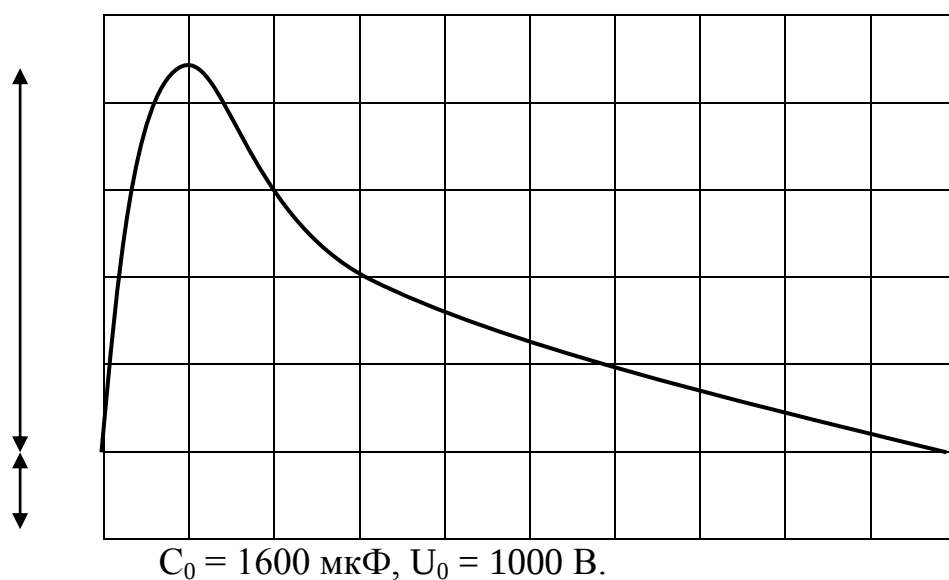


Рисунок 45. Типичная осциллограмма тока в индукторе №1.

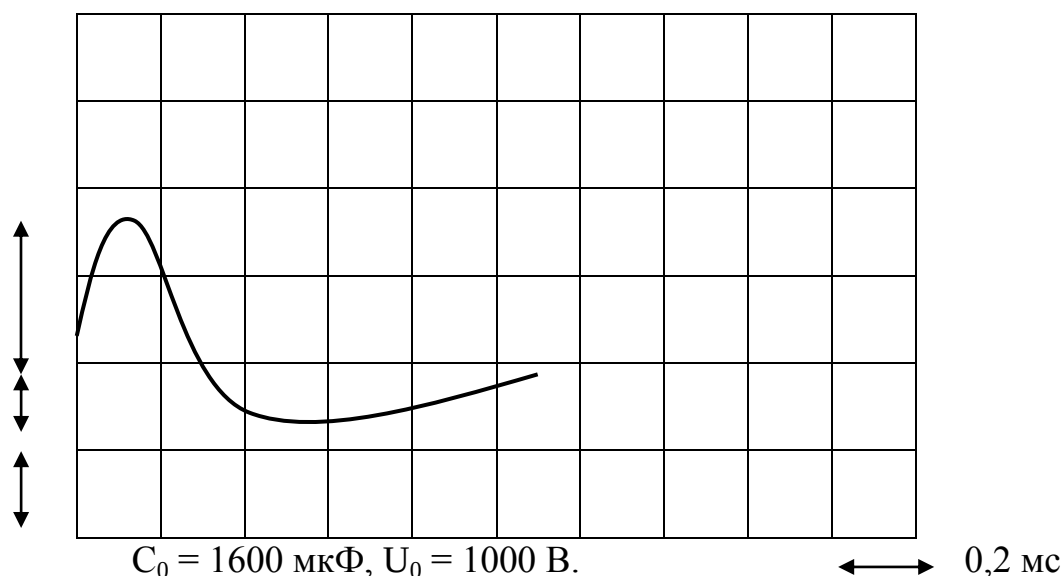


Рисунок 46. Типичная осциллограмма напряженности магнитного поля на поверхности индуктора №1.

Таблица15

| См      | 0    | 1,7  | 2,5  | 4,0  | 7,0  | 10,2 | 13,8 | 16   |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Н1, Тл. | 0,28 | 0,19 | 0,17 | 0,15 | 0,12 | 0,09 | 0,07 | 0,04 |
| Н2, Тл. | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |

**Над поверхностью индуктора  $H_x(z)$ ,  $X = 5 \text{ см.}$**

Таблица16

| см.     | 0    | 1,7  | 3,2  | 4,5  | 7,0  | 10,2 | 13,8 | 17,0 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Н1, Тл. | 0,28 | 0,23 | 0,19 | 0,17 | 0,14 | 0,10 | 0,07 | 0,04 |
| Н2, Тл. | 0,09 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,02 |

**Над поверхностью индуктора  $H_x(z)$ ,  $Y = 5 \text{ см.}$**

На рисунках 47 и 48 приведены кривые напряженности в зависимости от расстояния на поверхности и расстояния над поверхностью индуктора.

Из приведенных кривых можно определить возможные зоны воздействия импульсного магнитного поля. Так, например, поле на порядок уменьшается при  $x = 50 \text{ см}, y = 20 \text{ см}, z = 18 \text{ см.}$

Исследования, проведенные на двух типах плоских индукторов позволили установить параметры разрядного тока и распределения напряженности магнитного

поля в различных вариантах плоских индукторов. В итоге установлено, что использование плоских индукторов наряду с цилиндрическими существенно расширяет область применения магнитно-импульсного воздействия на материалы.

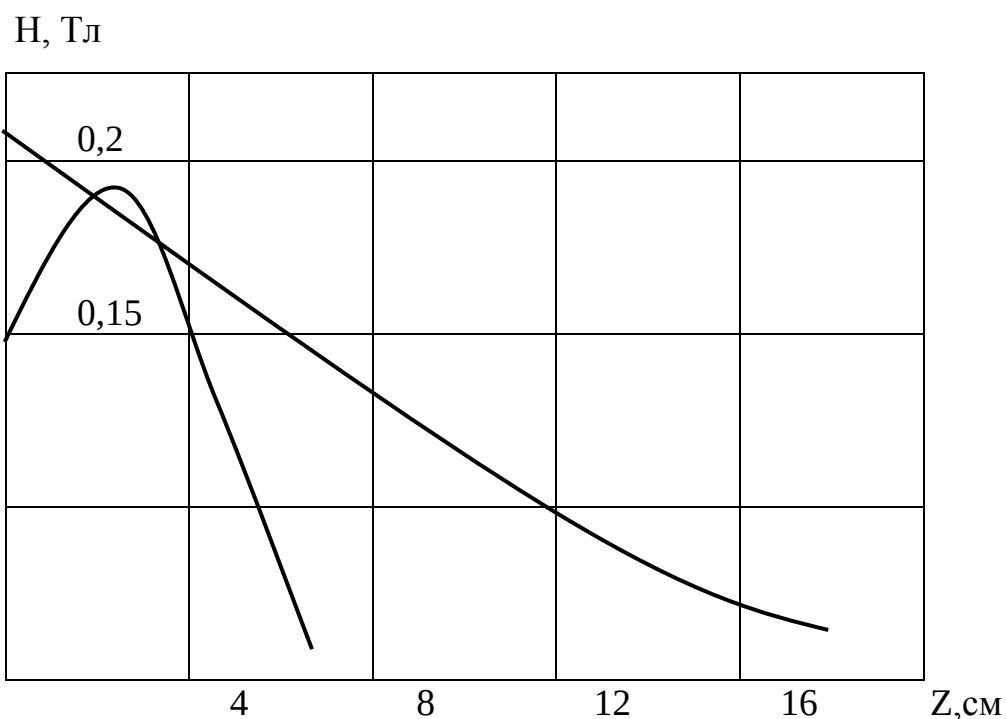


Рисунок 47. Кривые напряженности магнитного поля в зависимости от расстояния на поверхности индуктора.

1 –  $H_X(x)$  длинная сторона индуктора.

2 –  $H_Y(y)$  короткая сторона индуктора.

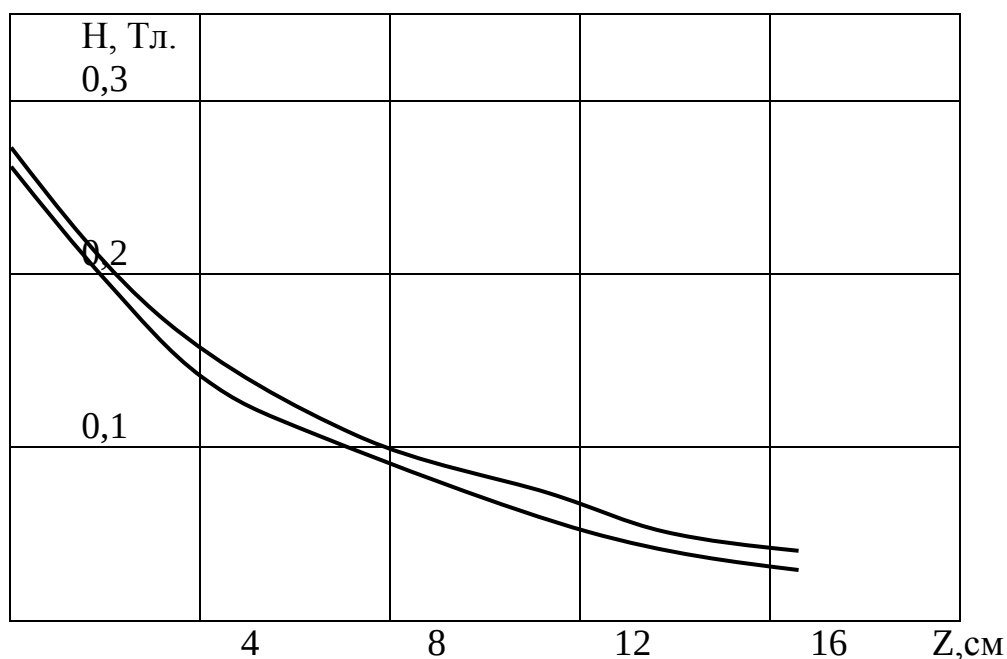


Рисунок 48. Кривые напряженности магнитного поля в зависимости от расстояния над поверхностью индуктора.

1 –  $H_X(z)$  длинная сторона индуктора при  $x = 5$  см.

2 –  $H_Y(y)$  короткая сторона индуктора при  $y = 5$  см.

Напряженность поля плоского прямоугольного индуктора по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  имеет разную интенсивность. Поэтому обрабатывать детали индуктором такой формой нецелесообразно ввиду получения неравномерных свойств на поверхности и по сечению деталей.

Для устранения этого недостатка использовался квадратный индуктор с последовательно соединенными обмотками. Квадратный индуктор характеризуется равномерным распределением напряженности магнитного поля на поверхности. Градиент напряженности магнитного поля относительно плоскости индуктора изменяется менее интенсивно.

Использование плоских индукторов при обработке материалов ведет к изменению свойств, которое можно связать с полями механических напряжений из-за нарушения структуры, приводящих к искажению электронного энергетического спектра.

### **Определение комплекса свойств рабочих колес после МИО**

После обработки были проведены испытания свойств материала используемого для изготовления колес. Материал используемый после отжига и улучшения был проведен рентгеновскими лучами и по смещению рентгеновских линий рассчитаны напряжения первого и второго ряда.

В Таблице 7 приведены свойства рабочих колес после МИО.



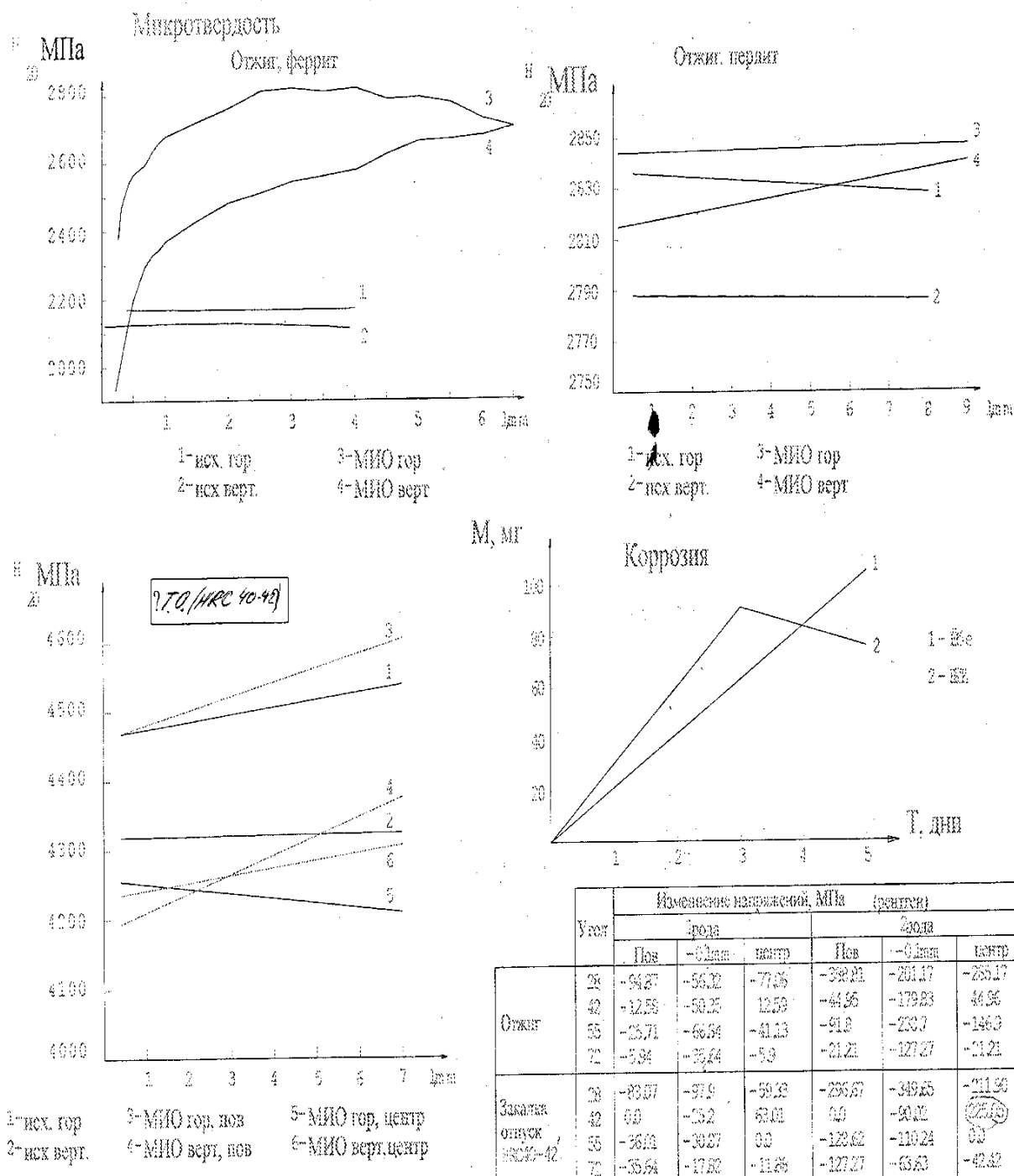
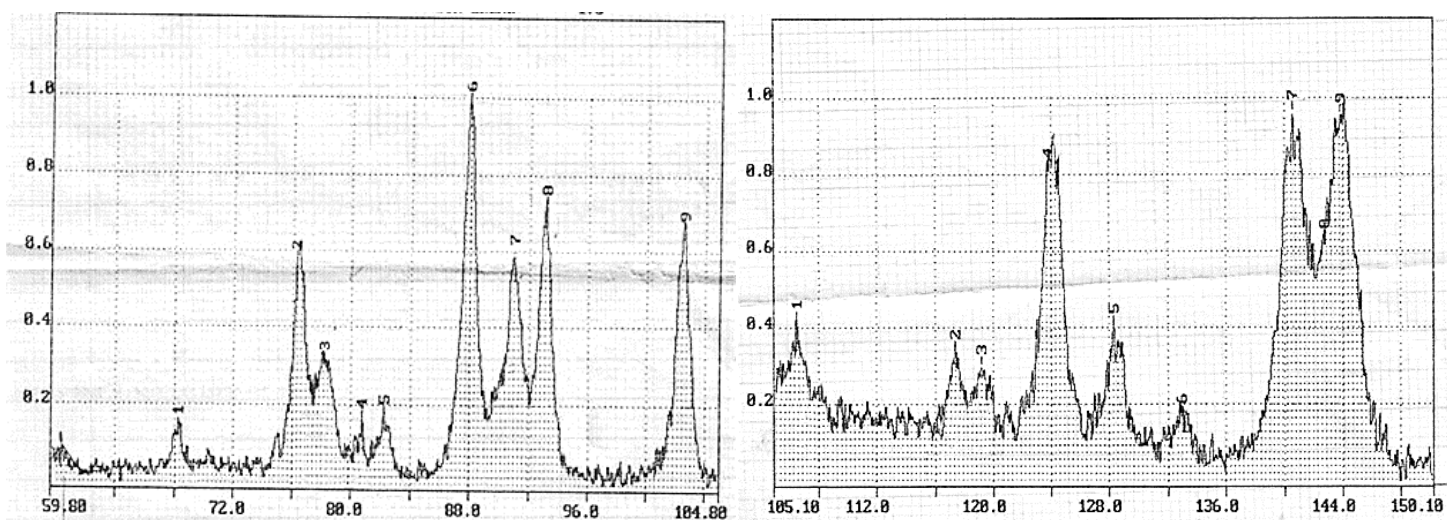


Рисунок 49. Сводные данные по объемному упрочнению рабочих колес по методу МНО.

Как видно из приведенных данных, в материале возникают сжимающие напряжения первого и второго рода, причем они существуют не только на поверхности, но и в сердцевине.

В результате этого повышаются не только свойства поверхности, но и свойства сердцевины.

В результате этого повышается надежность и долговечность колес.



ДО

ПОСЛЕ

Рисунок 50. Сводные данные после объемного упрочнения рабочих колес по методу МИО

В ходе исследования и анализа установлено, что под воздействием импульсных магнитных полей возникает ударная волна, которая, распространяется вглубь детали и тем самым происходит упрочнение внутренних слоев за счет увеличения усталостной прочности[128].

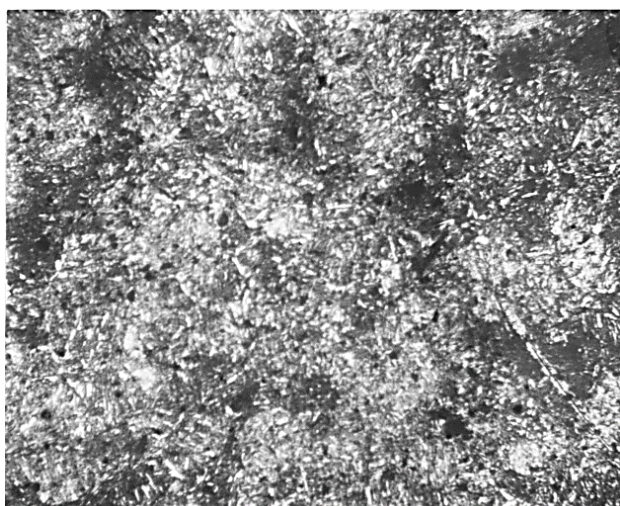


Рисунок 51. Структура поверхности рабочего колеса до и после МИО.

Из анализа данных рисунков 50 и 51 следует, что с помощью МИО удалось достичь существенного прогресса в таких характеристиках рабочих колес, как микротвердость и коррозионная стойкость.

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

### **3.5. Выводы по главе 3**

**1. Показаны основные параметры магнитно-импульсной установки, что позволило достичь существенного прогресса в объемном упрочнении рабочих колес**

**2. Технология магнитно-импульсной объемного упрочнения металлов в последние годы находит все большее применение в силу высокой эффективности, а также сравнительной простоты и экономичности применяемых установок.**

**3. При использовании термических методах изначально закладываются условия для неоднородности - структурной и свойств. Чтобы сгладить эти недостатки необходимо применять такие температурные режимы, которые были бы подобраны под деталь с определенными физическими размерами, или использовать другие ухищрения.**

## 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 прочностью магнитно-импульсной обработкой.

Основные результаты исследований и выводы получены лично автором диссертационной работы:

1. Установлено, что основным видом износа при эксплуатации 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, что обеспечивает равноресурсность 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пекин С.С., Ивановский В.Н., Сабиров А.А. - Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. — Издательство «Нефть и газ». РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2002. — 256 с. ISBN 5-7246-0172-9

2. Бухаленко Б.И. - Справочник по нефтепромысловому оборудованию. Недра. 1983 год, 390 с.

3. Богданов А.А. — «Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти», 1968 год, 272 с.

4. Рабинович А.И., Перельман О.М., Дорогокупец Г.Л., Куприн П.Б., Мельников М.Ю. Способ изготовления составных изделий патент РФ 2056973

5. Слепченко С. Битва за ресурс в осложненных условиях <http://www.novomet.ru>

6. Барвинок В.А. Баталов С.П. Владимиров А.И.

Международный транслятор-справочник: Буровой породоразрушающий инструмент: Т. 1: Шарошечные долота (под ред. Коршенбаума В.Я., Торгашова А.В., Мессера А.Г.), Из - во Нефть и Газ РГУ Нефти и Газ им. И.М.Губкина, 2003

7. <http://www.novomet.ru/>

8. Матаев Н.Н.- «Повышение эффективности работы установок погружных электроцентробежных насосов нефтегазодобывающих предприятий западной сибери». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск.

9. Р.Н. Пономарев — «Аварийные отказы оборудования УЭЦН и разработка мероприятий по их устранению». Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Уфа - 2006

10. <http://www.alnas.ru/>

11. <http://www.lemaz.ru/>
12. <http://www.borets.ru/>
13. <http://www.slb.ru/>
14. <http://www.bakerhughes.ru/bakerhughes>
15. <http://protein.bio.msu.su/~akula/Podr2~1.htm>
16. <http://www.statgraphics.com/>
17. <http://www.spss.ru/>
18. А.В. Киселев. Межмолекулярные взаимодействия в адсорбции и хроматографии. М., Высшая школа, 1986г.
19. А.А. Лопаткин. Теоретические основы физической адсорбции, изд. МГУ, 1983г.
20. Курс физической химии. Под ред. Я. И. Герасимова. т. 1, гл. 16 - 19-Адсорбция. М., Химия, 1973 г.
21. С.Грег, К.Синг. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М. Мир, 1984г.
22. В. Киселев, Д.П.Пошкус, Я.И. Яшин, Молекулярные основы адсорбционной хроматографии. М., Химия, 1986 г.
23. К. Жоаким, Л. Плевер. Нанонауки. Невидимая революция. — М.: КоЛибри, 2009г.
24. Фролов, К. В. (ред.): Современная трибология: Итоги и перспективы. Изд-воЛКИ, 2008 г.
25. <http://ru.wikipedia.org/>
26. Persson, Bo N.J.: Sliding Friction. Physical Principles and Applications. Springer, 2002г.
27. Rabinowicz, Ernest: Friction and Wear of Materials. Wiley-Interscience, 1995г.
28. Богданович П.Н., Прушак В.Я. Трение и износ в машинах: Учеб. для техн. вузов. Минск: Высш. шк. 1999г.
29. Буше Н.А. Трение, износ и усталость в машинах. М.: Транспорт, 1987 г.
30. Фукс И.Г., Буяновский И.А. Введение в трибологию / Нефть и газ, 1995 г.

31. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. М.: Высш. шк., 1991 год
32. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. – «Качество поверхностей и контакт деталей машин». Машиностроение, 1981 год.
33. Пригожин И., Введение в термодинамику необратимых процессов, пер. с англ., М., 1960г.
34. Розовский А.Я., Гетерогенные химические реакции, М., 1980г.
35. Воронин Г.Ф., Основы термодинамики, М., 1987г.
36. Шлугер М.А., Ажогин Ф.Ф., Ефимов М.А., Коррозия и защита металлов, М., 1981г.
37. Погодаев Л.И., Кузьмин В.Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. С.-Петербург: Академия транспорта РФ, 2006г., 608с.
38. Погодаев Л.И., Кузьмин А.А. Эрозия материалов и судовых технических средств в неоднородных жидких и газообразных средах. С.-Петербург: Университет водных коммуникаций, 2004г, 378
39. Триботехника (износ и безызносность) Учебник / Д. Н.Гаркунов. - 4-е изд., перераб. и доп. - М. : Изд-во МСХА, 2001г. - 603 с.
40. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. — М.: Наука, 1981г.
41. Поль Б. Макроскопические критерии пластического течения и хрупкого разрушения // Разрушение, том 2 / ред. Г.Либовиц. М.: Мир, 1975г.
42. Слепян Л.И. Механика трещин. Л.: Судостроение, 1990г. 296 с
43. C.J. Spenger, S.Y. Lee, S.T. Sheirer. " Hot corrosion evaluation of high temperature metal protective coatings for combustion turbines, " Thin Solid Films", 1979, Vol. 64, №2, с. 263 - 269.
44. Юнц Б.И., Максимов А.И., Астафьев А.А., Максимова М.А. "Защитные диффузионные покрытия лопаток высокотемпературных ГТУ", Энергомашиностроение, 1980г, № 2, с. 32 - 34.

45. Э.Д.Браун, Н.А.Буше, И.А.Буяновский и др./Под ред.А.В.Чичинадзе: Основы трибологии (трение, износ, смазка)/ Учебник для технических ВУЗов, 2-е издание, М.: Центр “Наука и техника”, 2001г. 778 с

46. Воронцов П.А., Соложенко В.Л., Шагров М.Н. - К вопросу совершенствования технологии изготовления поршневых колец.  
<http://science.ncstu.ru/articles/ns/07/04.pdf>

47. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н., Волчихина, Н.И., Шорина Н.С. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие / Под общей редакцией Н.Е.Денисовой. – Пенза: Изд-во Пензенский государственный университет, 2006г.

48. Глушкин Я.А.; Пальчиков А.И. - Ступень погружного многоступенчатого центробежного насоса.Патент RU (11) 2220327 (13) С2

49. Гущин Н.С., Ковалевич Е.В., Петров Л.А., Пестов Е.С. Новый метод изготовления рабочих органов погружных центробежных насосов из аустенитного чугуна с шаровидным графитом Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008г. № 4. С. 44-48

50. Ковалевич В. Е. Теоретические основы и практика получения чугуна с шаровидным графитом легкодисперсными модификаторами. Автореф. дисс. доктора техн. наук. 1996г.

51. Кривошеев А.Е., Маринченко Б.В., Фетисов Н.М. Механические свойства чугуна с шаровидным графитом в отливках // Литейное производство. 1972, вфЖ5. — С. 34-35.

52. Захарченко Э.В., Левченко Ю.Н., Горенко В.Г., Вареник П.А. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом. — Киев, Наукова думка, 1986.

53. Изосимов В.А., Усманов Р.Г., Канафин М.Н. Влияние химического состава высокопрочного чугуна на его механические свойства <http://rsl.npp.ru/>

54. Федоров Г.Е., Платонов Е.А., Кузьменко А.Е., Ямшинский М.М., Могилатенко В.Г., Цоновский С.И., Партала Л.П.. Пути повышения служебных характеристик хромомарганцевых чугунов  
[http://science-bsea.bgita.ru/2008/mashin\\_2008/fedorov\\_pyti.htm](http://science-bsea.bgita.ru/2008/mashin_2008/fedorov_pyti.htm)



55. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. –М.: Металлургия, 1983г. – 176 с
56. Гарбер М.Е. Отливки из белых износостойких чугунов. – М.: Машиностроение, 1972г. – 112 с.
57. Ребиндер П. А., Физико-химическая механика, М., 1958г.
58. Лихтман В. И., Щукин Е. Д., Ребиндер П. А., Физико-химическая механика металлов, М., 1962г.
59. Разрушение / Под ред. Либовица Г.- М.:т. 6, Мир,1976г.
60. Ухалин А.С.; Яркин В.Р. Способ поверхностного упрочнения чугуновых изделий. Патент РФ № 2011687
61. Рогов В.А., Ушомирская Л.А., Чудаков А.Д. Основы высоких технологий. М.: Вузовская книга, 2001. - 247с.
62. Тюрин Ю.Н. и др. Электролитно-плазменное упрочнение деталей буровых станков. Сварщик, №4, 1998г.
63. А. Хасуи, О. Моригаки Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. - 239с.
64. Самсонов В.Г., Верхотуров А.Д., Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев, Наукова думка, 1976г. - 220с.
65. Дубинин Г.Н., Коган Я.Д. Прогрессивные методы химико - термической обработки. М.: Машиностроение, 1979г. - 183с.
66. Гурьев А.М., Козлов Э.В., Игнатенко Л.Н., Попова Н.А. Физические основы термоциклического борирования. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 216 с., ил
67. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Иванов С.Г. и др. Диффузионное термоциклическое упрочнение поверхности стальных изделий бором, титаном и хромом // Фундаментальные проблемы современного материаловедения- №1.- 2007г. -С. 30 - 35.
68. Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., и др. «Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей. Ползуновский 40 Вестник №2 (ч. 2) 2005
- 69.Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д. и др. №3 2008

70. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение. — М.: Машиностроение, 1990г.
71. Ворошнин Л.Г., Ляхович Л.С. Борирование стали. М.: Metallurgy, 1978г. - 239 с.
72. Федюкин В.К., Смагоринский М.Е. Термоциклическая обработка металлов и деталей машин.-Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1989г.-255 с.
73. Шевченко О. И.. Управление структурой, составом и свойствами покрытий при плазменной наплавке за счет технологических воздействий : Дис. д-ра техн. наук : 05.02.01 Екатеринбург, 2006г. 355 с. РГБ ОД, 71:06-5/352
74. Белов В. В. Управление структурой и свойствами композиций для изготовления строительных материалов с учетом действия капиллярного сцепления в дисперсных системах : Дис. д-ра техн. наук : 05.23.05 : Тверь, 2003 358 с. РГБ ОД, 71:04-5/437
75. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение: учебник / А.А. Батаев, В.А. Батаев. - Новосибирск: Изд. НГТУ, 2002. - 384 с
76. А. А. Аппен Химия стекла. Изд. 2-е, Л: Химия 1974г.
77. Корнеев В.И., Данилов В.В. Жидкое и растворимое стекло Стройиздат. С-Пб., 1996г.
78. Карбид Бора <http://www.plasma.com.ua/chemistry/index.html>
79. Самсонов Г. В., Веницкий И.г.М. Тугоплавкие соединения (справочник).Раздел ГРНТИ: Машиностроительные материалы Metallurgy, 1970 г.
80. Горшков В.С. Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений Высшая школа 1988
81. П. А. Воронцов, В. М. Гончаров, М. Н. Шагров О целесообразности импульсно-лазерного упрочнения металлокерамических твердых сплавов/ Сборник научных трудов СевКавГТУ. Серия «Естественнонаучная», 2005г., №1 Северо-Кавказский государственный технический университет
82. Захарова Г.Г., Астафурова Е.Г., Найденкин Е.В.1, Добаткин С.В., Рааб Г.И. Создание методами интенсивной пластической деформации высокопрочных

материалов нового класса на основе промышленных образцов конструкционной низкоуглеродистой стали, обладающих высокой термостабильностью  
[www.misis.ru/Portals/0/Press/Documents/Pr\\_nov.doc](http://www.misis.ru/Portals/0/Press/Documents/Pr_nov.doc)

83. Рябчиков С.Я. Объемное упрочнение твёрдосплавного и алмазного породоразрушающего инструмента с целью повышения его эксплуатационных показателей / Автореферат дисс. на соискание уч. степени д.т.н. Томск – 2002г.

84. Арзамасов Б. Н., Брострем В. А. , Буше Н. А. , Быков Ю.А., Васильева А.Г., Гардымов Г.П., Гершман И.С., Гини Э.Ч., Дриц М.Е., Зябрев А.А. и др. Конструкционные материалы - М.: Машиностроение, 1990. - 688 с.

85. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. — М.; Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006 г. 660 с.

86. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. М: Металлургия, 1982.

87. Власюк В.И., Рябчиков С.Я., Будюков Ю.Е. и др. Новые технологии в создании и использовании алмазного породоразрушающего инструмента. – М.: «Геоинформмарк», 2002г. – 140 с.

88. Рябчиков С.Я. Повышение износостойкости породоразрушающего инструмента различными физическими способами. – М.: МГП «Геоинформмарк», Техн., технол. и орг-ия геол. развед. работ. Вып. 1, 1993. – 38 с.

89. Осецкий А.И, Рябчиков С.Я., Сулакшин С.С., и др. Методические рекомендации по криогенной обработке алмазных буровых коронок.–Л.: ВИТР, 1987г.– 12 с

90. Мамонтов А.П., Рябчиков С.Я., Чахлов Б.В. Применение ионизирующего излучения для упрочнения и диагностики породоразрушающего инструмента //Тез. докл. Регион. научно-технической конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении». – Тюмень, - 1997г.- С. 113-115.

91. Чудина О.В. Комбинированные технологии поверхностного упрочнения конструкционных сталей: дис. докт. техн. наук / О.В. Чудина. – Москва, 2004г. – 336 с.

92. Федоров С.В. Комбинированная поверхностная ионно-плазменная обработка инструмента из быстрорежущей стали: дис. канд. техн. наук / С.В. Федоров. – Москва, 2004г. – 108 с

93. Суханов Р.С. Повышение износостойкости прорезных фрез на операции фрезерования пазов в язычковых иглах комбинированным ионно-лазерным упрочнением: дис. канд. техн. наук / Р.С. Суханов. – Иваново, 2003г. – 108 с.

94. Власов С.Н. Повышение работоспособности режущего инструмента путем комбинированной упрочняющей обработки: дис. канд. техн. наук / С.Н. Власов. – Ульяновск, 2000г. – 294 с.

95. Федюкин В.К. Научное обоснование и разработка технологий улучшающей термоциклической обработки металлических материалов: дис. докт. техн. наук / В.К. Федюкин. – Санкт-Петербург, 1993г. – 323 с.

96. Гурьев А.М. Экономно-легированные стали для литых штампов горячего деформирования и их термоциклическая и химико-термоциклическая обработка: дис. докт. техн. наук / А.М. Гурьев. – Томск, 2001. – 487 с.

97. Забелин, С.Ф. Основы технологии и кинетической теории процессов диффузионного насыщения сталей в условиях термоциклического воздействия на материал: дис. докт. техн. наук / С.Ф. Забелин. – Чита, 2004. – 219 с.

98. Шматов А.А. Упрочнение режущего стального инструмента технологически эффективными методами

[http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Ptsm/2008\\_36/index.html](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/Ptsm/2008_36/index.html)

99. В.М. Федин, к.т.н. А.И. Борц, Объемно-поверхностная закалка литых деталей железнодорожного транспорта

[http://www.termoobrabotka.com.ua/rus/referats/rus\\_referat005.html](http://www.termoobrabotka.com.ua/rus/referats/rus_referat005.html)

100. Абраменко Д. Н. Повышение износостойкости литых деталей грузовых вагонов дуговой наплавкой слоя стали со структурой игольчатого феррита: диссертация кандидата технических наук Москва, 2008г.- 159 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-5/391

101. Марков Д. П. Трибологические аспекты повышения износостойкости и контактно-усталостной выносливости колес подвижного состава : Дис. док. техн. наук: 05.02.04 Москва, 1996 386 с. РГБ ОД, 71:97-5/633-8

102. Лазерные технологии обработки материалов, создаваемые в ИПЛИТ РАН /В.Я.Панченко, В.В.Васильцов, В.С.Голубев, А.Н.Грезев, В.Д.Дубров, А.А.Карабутов, В.С.Майоров, А.Н.Сафонов // Современные лазерно-информационные технологии. Сборник трудов ИПЛИТ РАН. Интерконтакт Наука, 2005, С. 191-198.

103. Андрияхин В.М., Майоров В.С., Якунин В.П. Расчет поверхностной закалки железо-углеродистых сплавов с помощью технологических  $\text{CO}_2$ -лазеров непрерывного действия// Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 6. С. 140-147.

104. Технологические лазеры. Справочник/ Г. А. Абильсиитов, В. С. Голубев, В. С. Майоров и др. // Под общ. ред. Г.А.Абильсиитова. Т.1. - М.: Машиностроение, 1991. 432 с.

105. Андрияхин В. М., Майоров В. С., Чеканова Н.Т., Якунин В. П. Экспериментальная проверка расчетов термоупрочнения железоуглеродистых сплавов с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера непрерывного действия// Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 9, с. 145-150.

106. Бернштейн М.Л., Пустовойт В.Н. Термическая обработка стальных изделий в магнитном поле. - М.: Машиностроение, 1987.- 256 с.

107. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструментов и деталей машин.- М.: Машиностроение, 1982

108. Галей М.Т. и др. Изучение влияния магнитного поля на стойкость быстрорежущего инструмента. //Станки и инструменты, 1981, № 6, с. 31-34.

109. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение режущего инструмента и деталей деревообрабатывающих машин// Деревообрабатывающая промышленность. -1990. - № 6.- с. 7-8.

110. Малыгин, Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин [Текст] / Б. В. Малыгин. - М. : Машиностроение, 1989. - 112 с. - Б. ц.

111. Кухарь В.Д. Магнитно-импульсная штамповка анизотропных, механически и геометрически неоднородных трубных заготовок // Дисс. докт. техн. наук, ТулПИ.- Тула .- 1989г.- 360с.

112. Самохвалов В.Н.. Разработка теории и практических основ процессов штамповки тонкостенных деталей давлением импульсных магнитных полей без поименения жесткого формообразующего инструмента: Дисс докт. техн. наук .- М.: МГАИ (МАИ), 1996.- 284 с

113. Юдаев В.Б., Красовский В.В.. Увеличение усталостной прочности деталей при воздействии импульсных магнитных полей // Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность материалов - Воронеж, 1994-С 32-33

114. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок.» / Под ред. В.Я.Панченко. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 664 с. – ISBN 978-5-9221-1023-5.

115. Андрияхин В. М., Майоров В. С., Чеканова Н.Т., Якунин В. П. Экспериментальная проверка расчетов термоупрочнения железоуглеродистых сплавов с помощью СО<sub>2</sub>-лазера непрерывного действия// Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 9, с. 145-150.

116. Попов А.А., Попова Л.Е.. Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: Справочник термиста. М.: Металлургия, 1965.

117. Application of laser technology in quality improvement of stamping tool working surfaces / V.Ya Panchenko, V.V. Vasiltssov, V.S.Golubev et al. // .Proc. SPIE: Vol. 4644 (2001). Pp. 133-140.

118. Алифанов А.В., Благодарный В. М., Лях А.А. Магнитно-импульсная упрочняющая обработка металлических изделий [web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf10/2-str-22-25.pdf](http://web.tuke.sk/fvtpo/casopis/pdf10/2-str-22-25.pdf)

119. Отчет о НИР: «Исследование эффектов обработки сильными импульсными магнитными и электрическими полями на пластические и физико-механические свойства материалов для машино- и приборостроения». Фонд фундаментальных

исследований РБ; Физико-технический институт НАН РБ. Проект №Т94-367. № ГР 19942666. Минск, 1997г.

120. Стрижало В.А. и др. Прочность сплавов криогенной техники при электромагнитных воздействиях. — Киев: Наукова думка, 1990г.

121. Спицын В.И., Троицкий О.А. Электропластическая деформация металлов.— М.: Наука, 1985г.

122.С.В.Давыдов эффективность магнитно-импульсной обработки/ Вестник Брянского государственного технического университета. 2007. № 3(15)

123. Воробьева Г.А. О структурных превращениях в металлах и сплавах под воздействием импульсной обработки / Г.А. Воробьева, А.Н. Иводитов, А.М. Сизов // Изв. АН СССР. Металлы.- 1991г.- № 6.- С.131-137.

124. Дураченко А.М. Влияние импульсной обработки на релаксационные спектры аморфных сплавов на основе железа и никеля / А.М.Дураченко, Е.Я. Малиночка // Изв. АН СССР. Металлы.- 1985г.- № 6.- С. 167-170.

125. Бахарев, О.Г. Частичный распад цементита при пластической деформации и деформационное старение перлитной стали // Металлофизика. -1989г. -Т.11.- № 6.- С. 78-83.

126. 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.

127. 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.

128. 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.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ А – ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**

### **Определение цены литой заготовки**

Стоимость литой заготовки можно приближенно определить как:

$$C = 150 \cdot M_z \cdot K_m \cdot (10000/N)^{0,12} \cdot K_{cl} \cdot K_m =$$
$$= 150 \cdot 0,55 \cdot 1 \cdot (1000/140000)^{0,12} \cdot 1,04 \cdot 1,2 = 56,902 \text{ руб.}$$

где  $M_z$  – масса заготовки после обрубки литников, кг;

$K_m$  – коэффициент точности отливки (нормальной точности (2 класс) – 1,0; повышенной точности (1 класс) – 1,5; литье под давлением – 2,1);

$N$  – годовой объем производства отливок, шт.;

$K_{cl}$  – коэффициент сложности отливок (простые отливки – 0,8; средней сложности с 2-3 стержнями – 1,04 сложные многостержневые с наличием тонких и длинных тел – 1,45; особо сложные, формуемые в 3-4 полуформах – 2,0);

$K_m$  – коэффициент материала (чугун – 1,1...1,3; стали углеродистые – 1,4...1,5; стали легированные – 1,6...2,0; алюминиевые сплавы – 6,0; бронзы – 9,0).

### **Расчет затрат на топливо и электроэнергию для технологических целей.**

Этот вид затрат состоит из расходов на топливо и электроэнергию используемых для нагрева заготовок (при получении заготовок-поковок и их термообработки), энергию для электропечей в литейном производстве, электроэнергию, используемую в электрохимическом, электроэрозионном производствах.

■ при использовании электроэнергии затраты определяются по формуле:



$$Зэл = (Нэл \cdot m \cdot Цэл) / 1000 = (600 \cdot 0,55 \cdot 2,7) / 1000 = 0,891$$

где  $Нэл$  - норма расхода электроэнергии на нагрев 1 тонны заготовок, квт-час/т;  $m$  - масса заготовки;  $Цэл$  - цена 1 квт-часа электроэнергии для нагрева, руб.

### **Затраты на основную заработную плату основных рабочих.**

Расходы на заработную плату основных (производственных) рабочих определяются исходя из норм штучного времени на технологические операции, соответствующие маршруту обработки детали.

$$ЗПо = (\sum T_{шт-к_i} \cdot Сч_i) \cdot K = (0,54 \cdot 98,5) \cdot 1,5 = 79,78 \text{ руб.}$$

где  $T_{шт-к_i}$  - время штучно-калькуляционное на операцию, час;

$Сч_i$  - часовая тарифная ставка соответствующая разряду рабочего, руб.;

$T_{шт_i} Сч_i$  - расценка по одной операции, руб;

$\sum T_{шт_i} Сч_i$  - расценка по всем операциям технологического процесса, где  $m$  - число операций.

$K$  - коэффициент, учитывающий премии и другие доплаты, увеличивающие фактический часовой заработок рабочего по сравнению с тарифной ставкой  $K = 1,5$ ;

### **Дополнительная заработная плата основных и вспомогательных рабочих**

$$ЗПдоп = ЗПо \cdot 14 \% = 11,17 \text{ руб}$$

К дополнительной заработной плате относятся оплата очередных и учебных отпусков, выплаты в случае временной нетрудоспособности, все виды оплат в нерабочее время в соответствии с действующим законодательством. Размер выплат составляет 14% от суммы основной заработной платы.

### **Страховые взносы.**

Отчисления с фонда заработной платы производятся в соответствии с законодательством. Отчисления производятся в пенсионный фонд, фонд медицинского страхования и фонд социального страхования в соответствии с установленным процентом (30%).

Размер страховых взносов вычисляется по формуле:

$$Зстр.вз. = [(ЗПосн + ЗПдон) \cdot 30 \%] / 100\% = 27,28 \text{ р.}$$

### **Заработная плата вспомогательных рабочих**

Заработная плата вспомогательных рабочих входит в статью 9 калькуляции - общепроизводственные расходы.

Если рабочие не закреплены за определенными рабочими местами, заработная плата вспомогательных рабочих рассчитывается пропорционально заработной плате основных рабочих

$$ЗПвсп = 0,88 \cdot ЗПо = 0,88 \cdot 79,78 = 70,20 \text{ руб}$$

### **Амортизация оборудования.**

$$\sum_{i=1}^m A_{об} = (C_{об} \cdot tp \cdot Ha) / \Phi_{год} * 100\% = 32,38 \text{ р.}$$

$$A_{об} = (2100000 \cdot 4,5/60 \cdot 15\%) / 2030 \cdot 100\% = 11,63 \text{ р.} \quad \text{ток. стан. 16K20}$$

$$A_{об} = (5000000 \cdot 3/60 \cdot 15\%) / 2030 \cdot 100\% = 18,47 \text{ р.} \quad \text{НААС токар. с ЧПУ}$$

$$A_{об} = (180000 \cdot 4/60 \cdot 15\%) / 2030 \cdot 100\% = 0,88 \text{ р.} \quad \text{моечная машина}$$

$$A_{об} = (110000 \cdot 10/60 \cdot 15\%) / 2030 \cdot 100\% = 1,35 \text{ р.} \quad \text{камерная печь}$$

$$A_{об} = (500000 \cdot 0,08/60 \cdot 15\%) / 2030 \cdot 100\% = 0,05 \text{ р.} \quad \text{установка МИО}$$

где  $C_{об}$  - первоначальная стоимость оборудования, руб;

$tp$  - время обработки детали на данном виде оборудования (to), час;

$Ha$  - годовая норма амортизационных отчислений (устанавливается налогоплательщиком), для технологического оборудования - 15%, для средств транспорта - 15%.

$\Phi_{год}$  - годовой фонд времени работы оборудования:

при односменной работе - 2030 час,

при двухсменной работе - 4015 час.

Амортизационные отчисления рассчитываются для каждого вида оборудования, участвующего в технологическом процессе обработки детали.

### Амортизация ценных инструментов.

$$\Sigma A_{ин} = (\Sigma C_{ин} \cdot t_p \cdot H_a) / \Phi_{год} \cdot 100\%$$

$$A_{ин} = (\Sigma C_{ин} \cdot t_p \cdot H_a) / \Phi_{год} \cdot 100\% = (10500 \cdot 3/60 \cdot 20\%) / 2030 \cdot 100\% = 0,05 \text{ р. резец}$$

где  $C_{ин}$  - стоимость инструмента, руб;

$t_p$  - время обработки детали данным инструментом, час;

$H_a$  - норма амортизационных отчислений 20%;

Амортизационные отчисления рассчитываются для всех инструментов со сроком службы более 1 года.

### Затраты на электроэнергию.

$$\Sigma Z_{эн} = (M_n \cdot t_p \cdot K_u \cdot C_{эл}) / \Phi_{год} = 5,58 \text{ р.}$$

$$Z_{эн} = (15 \cdot 4,5/60 \cdot 0,75 \cdot 2,7) = 2,27 \text{ р. ток. стан.}$$

$$Z_{эн} = (18 \cdot 3/60 \cdot 0,75 \cdot 2,7) = 1,82 \text{ р. НААС токар. с ЧПУ}$$

$$Z_{эн} = (1 \cdot 4/60 \cdot 0,75 \cdot 2,7) = 0,14 \text{ р. моеч. Маш.}$$

$$Z_{эн} = (1 \cdot 10/60 \cdot 0,75 \cdot 2,7) = 0,33 \text{ р. печь}$$

$$Z_{эн} = (3 \cdot 10/60 \cdot 0,75 \cdot 2,7) = 1,01 \text{ р. установка МИО}$$

где  $M_n$  - номинальная мощность электродвигателя, кВт;

$t_p$  и  $\Phi_{год}$  - см п.7.2.1.

$K_u$  - коэффициент использования оборудования по времени и по мощности  $K_u = 0,75$  ;

$C_{эл}$  - стоимость одного кВт - часа силовой электроэнергии, руб.

Остальные виды общепроизводственных косвенных затрат, а именно затраты на ремонт оборудования, затраты на содержание зданий цеха и управления цехом и т.д. учитываются процентом в калькуляции затрат в пункте прочие расходы.

### КАЛЬКУЛЯЦИЯ затрат на единицу продукции.

| N<br>п/п | Наименование статей затрат                                                                                                       | Значения расчетных<br>показателей, руб. |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 1.       | Сырье и материалы                                                                                                                | 56,9                                    |
| 2.       | Топливо и энергия на технологические цели                                                                                        | 0,89                                    |
|          | <b>Итого: прямые материальные затраты</b>                                                                                        | 57,79                                   |
| 3.       | Основная заработная плата основных рабочих                                                                                       | 79,78                                   |
| 4.       | Дополнительная зарплата основных рабочих                                                                                         | 11,17                                   |
| 5.       | Страховые взносы основных рабочих                                                                                                | 27,28                                   |
| 6.       | Заработная плата                                                                                                                 |                                         |
| 6.1.     | Заработная плата вспомогательных рабочих                                                                                         | 70,20                                   |
| 6.2.     | Дополнительная зарплата вспомог. рабочих                                                                                         | 9,82                                    |
| 6.3.     | Страховые взносы вспомогательных рабочих                                                                                         | 24,0                                    |
| 6.4.     | Амортизационные отчисления от первоначальной стоимости технологического оборудования                                             | 32,38                                   |
| 6.5.     | Амортизационные отчисления от первоначальной стоимости ценного инструмента                                                       | 0,05                                    |
| 6.6.     | Силовая электроэнергия                                                                                                           | 5,58                                    |
| 6.7.     | Прочие расходы, не предусмотренные предыдущими статьями, в размере 150% от суммы расходов по статьям с 6.1. по 6.8. включительно | 213,04                                  |
|          | <b>Итого: сумма затрат 1 по 6.9. включительно составляет цеховую себестоимость С<sub>цех</sub></b>                               | 389,06                                  |
| 7.       | Общехозяйственные расходы 250 -300% от основной заработной платы основных рабочих                                                | 199,45                                  |
|          | <b>Итого: сумма затрат с 1 по 7 включительно составляет производственную себестоимость С<sub>пр</sub></b>                        | 588,51                                  |
| 8.       | Коммерческие расходы 1,5-5% от производственной себестоимости                                                                    | 8,82                                    |

|                                                                                                    |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>Итого: сумма затрат с 1 по 8 включительно<br/>составляет полную себестоимость ед. продукции</b> | <b>597,33</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|

Норматив рентабельности, или закладываемая прибыль, принимается в размере принятом в машиностроении РФ и составляет 25% от полной себестоимости.

Износостойкость рабочих колес погружных центробежных насосов после борирования и магнитно-импульсной обработки увеличилась в 2,3 раза при этом, удорожании детали составляет не более 12%.