

нитно-электрического упрочнения и других, причем без применения защитной атмосферы. Это существенно снижает себестоимость наносимого покрытия и, следовательно, восстанавливаемой (упрочняемой) детали. В частности, использование обработанного по вышеприведенной технологии порошка для магнитно-электрического упрочнения показывает достаточно высокие результаты как по качеству покрытия, так и по его износостойкости (микротвердость полученного покрытия 1450 – 1700 HV).

Исследование закономерностей химико-термической обработки, а также структуры получаемых в результате материалов из отходов производства чугунной дроби позволяет прийти к **выводам:**

1. По гранулометрическому составу свыше 70% отходов производства чугунной дроби пригодны к дальнейшей ХТО и использованию для нанесения покрытий различными методами. Наиболее подходящий для МЭУ порошок фракции от 200 до 630 мкм составляет 65% от объема отходов, степень сфероидизации отходов – около 70%;
2. Впервые изучены закономерности химико-термической обработки порошка белого чугуна. Установлено, что повышенная дефектность и неравновесность ускоряет диффузионные процессы. Полученные в виде графиков закономерности позволяют получать диффузионно-легированные порошки на основе белого чугуна с прогнозируемой толщиной борированного слоя для получения восстановительно-упрочняющих покрытий с заданными свойствами.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия из них/ Ф.И.Пантелеенко. – Мн.: УП «Технопринт». 2001. – 300 с.
2. Авсиевич А.М. Исследование износостойкости плазменных напыленных покрытий из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошков на железной основе в условиях трения скольжения / Авсиевич А.М.,

- Спиридонов Н.В., Константинов В.М.// Трение и износ. - 2002. – Т 23, № 5. - С. 515 - 519.
3. Сороговец В.И. Получение износостойких покрытий плазменной наплавкой из диффузионно-легированных самофлюсующихся порошковых материалов: автореф. дисс. канд. технич. наук: 05.02.01/ В.И.Сороговец; Полоцкий государственный университет. - Новополоцк, 2001. – 21 с.
  4. Лисовский А.Л. Повышение износостойкости пар трения скольжения лазерной обработкой: автореф.дисс.канд.технич.наук: 05.03.07/ А.Л.Лисовский; Академия наук Республики Беларусь, Физико-Технический институт АН Беларуси. – Мн., 1996. – 20 с.
  5. Константинов В.М. Разработка самофлюсующихся наплавочных материалов на железной основе и защитных покрытий из них специализированного назначения с использованием металлоотходов: автореф.дисс.канд.техн.наук: 05.16.01 / В.М.Константинов; Белорусская Государственная Политехническая Академия. – Мн., 1992. – 19с.
  6. Петришин Г.В. Диффузионно-легированный стальной порошок для магнитно-электрического упрочнения./ Г.В.Петришин, Е.Ф.Пантелеенко, А.Ф.Пантелеенко// Упрочняющие технологии и покрытия. Серия Машиностроение. 2006. - №4. – с. 26 – 31.
  7. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся порошки для восстановительно-упрочняющих технологий./ Пантелеенко Ф.И., Пантелеенко Е.Ф.//Порошковая металлургия. Республиканский межведомственный сборник научных трудов – 2006. – Выпуск 29. – с.122 – 128.
  8. Тарасов С.Ю. Структурные особенности боридных покрытий триботехнического назначения./ С.Ю.Тарасов, Г.В.Трусова, А.В.Колубаев, О.В.Сизова// МИТОМ. 1995. - №6. – с.35 – 38.
  9. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Борисенко Г.В. [и др.]; под общ.ред. Л.С.Ляховича. – М.: Металлургия, 1981. – 424с.
  10. Ворошнин Л.Г. Борирование стали / Л.Г.Ворошнин, Л.С.Ляхович. – М.: Металлургия, 1978. – 240 с.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

УДК 621.891.67-762

Голуб В.М., Голуб М.В., Добрияник Ю.А.

## КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ГИДРОМАШИН

**Введение.** Состояние уплотнений валов гидромашин, осевых и радиальных опор скольжения определяют ресурс работы гидромашин, ее надежность и долговечность. Условия эксплуатации машин достаточно разнообразны, поэтому трудно назвать область техники, где бы не возникали проблемы герметизации. Неверный выбор уплотнений, их низкое качество, а также неправильные условия эксплуатации приводят к снижению технических показателей машин и большим экономическим потерям. Проведенный анализ отказов нефтяного оборудования, в частности насосов магистральных нефтепроводов, показал, что 50-60% вынужденных остановок происходят из-за износа уплотнений и их отказов. В качестве уплотнений валов применяют уплотнения торцового типа, основными герметизи-

рующими элементами которых являются кольца пар трения. На контакте колец создается гидравлическое сопротивление течению жидкости, равное перепаду давления уплотняемой среды. Выбор конструктивных и технологических параметров торцовых уплотнений определяется, в первую очередь, из условий минимального износа контактных колец и минимально допустимой, стремящейся к нулю, утечки уплотняемой среды через торцовую щель пары трения.

Величина износа колец зависит от свойств материала контактной поверхности, характера смазки – нехваткой смазочного материала или плохой смазочной способностью. Положение обостряется при наличии в уплотняемой среде механических абразивных включений и их концентрации.

*Голуб Владимир Михайлович, к.т.н., доцент, и.о. зав. кафедрой машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Голуб Михаил Владимирович, д.т.н., профессор, профессор кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Добрияник Юрий Алексеевич, преподаватель-стажер кафедры машиноведения Брестского государственного технического университета.*

*Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*

Для обеспечения высокой износостойкости узлов трения термической, термохимической или других технологических методов обработки поверхностей материалов пар трения иногда недостаточно. Необходимы новые материалы, способные повысить износостойкость, долговечность и надежность узла трения.

Наибольший интерес для решения данной проблемы представляют композиционные материалы (КМ). Пара трения из таких материалов сочетает в себе одновременно антифрикционные свойства, высокую термостойкость и износостойкость.

Обычно антифрикционность пары трения достигается положительным градиентом механических свойств по глубине разделяемой пленки смазки. Однако, если смазкой служит рабочая среда, не обладающая хорошей смазывающей способностью, то в этом случае необходимо обеспечить положительный градиент механических свойств в самом материале пары трения. Это возможно при таком составе материала, который в процессе трения образует на контактной поверхности защитную пленку из структурных составляющих материала в результате его растворения – так называемый эффект избирательного переноса.

Такие КМ получены методом порошковой металлургии. Разработан способ нанесения их на контактные поверхности деталей. Определены оптимальные составы композиций, включающие карбиды вольфрама, медь, никель, кобальт и др. элементы [1,5].

### 1. Строение и структура композиционных материалов

Комбинирование различных веществ остается сегодня одним из основных способов создания новых материалов. Большинство современных конструкционных материалов представляют собой композиции, которые позволяют техническим изделиям обладать определенным сочетанием эксплуатационных свойств. Во всех случаях – это система разных материалов, каждый из составляющих которой имеет свое конкретное назначение применительно к рассматриваемому готовому изделию. Совместная работа разнородных составов дает эффект, равносильный созданию нового материала, свойства которого отличаются от свойств каждого из его составляющих компонентов.

Композиционные материалы представляют собой гетерофазные системы, полученные из двух или более компонентов с сохранением основных свойств каждого отдельного.

Для композиционных конструкционных материалов характерны следующие признаки [1]:

- состав и форма компонентов материала определены заранее;
- компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала;
- материал является однородным в макромасштабе и неоднородным в микромасштабе.

В большинстве случаев компоненты композиции различны по геометрическому признаку. Один из компонентов, обладающий непрерывностью по всему объему, является матрицей; компонент прерывный, разделенный в объеме композиции, считается усиливающим или армирующим. Матричными материалами могут быть металлы и их сплавы, органические и неорганические полимеры, керамика и другие вещества. Усиливающими (армирующими) компонентами чаще всего являются тонкодисперсные порошкообразные частицы или волокнистые материалы различной природы.

Классифицируют КМ по следующим основным признакам:

- материалу матрицы;
- геометрии, структуре и расположению компонентов;
- методу получения.

Иногда КМ разделяют по назначению. Но так как одни и те же КМ могут иметь различное назначение, то этот принцип классификации используется редко.

В соответствии с геометрией армирующих элементов (порошки или гранулы, волокна, пластины) КМ делятся на сле-

дующие виды: порошковые (гранулированные), волокнистые и пластинчатые. К первой группе относятся дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДКМ) и КМ типа псевдосплавов и другие композиции, получаемые из смесей различных порошков. Ко второй - КМ, армированные непрерывными и дискретными волокнами (например, композиции алюминий - борные волокна, стеклопластики), к третьей - непрерывными и дискретными пластинами (например, слоистые КМ, представляющие собой набор из чередующихся фольг из стали, алюминия и титана). Максимальный размер дискретных волокон и пластин в материалах второй и третьей групп соизмерим с характерным размером образца КМ.

В соответствии с классификацией КМ по структуре и расположению компонентов КМ разделяются на группы с каркасной, матричной, слоистой и комбинированной структурой. К композиционным материалам с каркасной структурой относятся, например, псевдосплавы, полученные методом пропитки; с матричной – дисперсно-упрочненные КМ и армированные материалы; со слоистой – композиции, полученные из набора чередующихся фольг или листов материалов различной природы или состава, и комбинированной – материалы, содержащие комбинации первых трех групп (например, псевдосплавы, каркас которых упрочнен дисперсными включениями, относятся к материалам, сочетающим каркасную и матричную структуры) [2].

КМ с матричной структурой могут быть армированы элементами, имеющими хаотичную ориентацию в пространстве (дисперсными включениями, дискретными или непрерывными волокнами). В этом случае материал является изотропным или квазиизотропным. КМ с матричной структурой, упрочненные армирующими элементами, ориентированными определенным образом в пространстве, относятся к упорядоченно армированным. Они подразделяются на одноосно армированные или однонаправленные (с расположением волокон вдоль одной оси), двухосно армированные (с плоскостным расположением арматуры) [2,3].

В соответствии с классификацией по методам получения КМ подразделяются на КМ, полученные жидко- и твердофазными методами (здесь указаны только главные технологические приемы, обеспечивающие окончательное формирование материала). К жидкофазным методам относятся пропитка (например, пропитка арматуры полимерами или расплавленными металлами), а также направленная кристаллизация сплавов.

К твердофазным методам получения относят – прессование, прокатка, экструзия, ковка, штамповка, уплотнение взрывом и другими динамическими методами, диффузионная сварка, волочение и т.п. Для КМ, полученных твердофазными методами, характерно использование матрицы в виде порошка или тонких листов. Армированные КМ, матрица которых в исходном состоянии представляет собой тонкие листы (фольги), а вся заготовка - набор чередующихся слоев матрицы и армирующих элементов, уложенных в заданной последовательности, в литературе иногда называют "композиции типа сэндвич".

При получении КМ методами осаждения – напыления, матрица наносится на волокна из растворов солей или других соединений, из парогазовой фазы, из плазмы и т.п. Комбинированные методы заключаются в последовательном или параллельном применении нескольких методов. Например, плазменное напыление используется как предварительная операция, а в качестве окончательной применяется прокатка или диффузионная сварка.

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы (ДКМ) и псевдосплавы относятся к классу порошковых КМ.

Структура ДКМ представляет собой матрицу из чистого металла или сплава, в которых равномерно распределены на заданном расстоянии одна от другой тонкодисперсные частицы

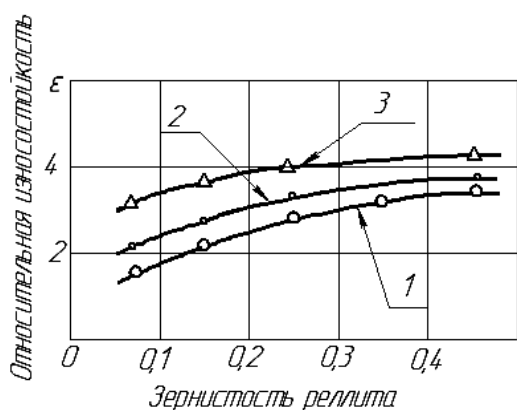


Рис. 1. Зависимость относительной износостойкости композиционного материала при добавлении в шихту тонкозернистого порошка ВК-6: 1 – 20%; 2 – 30 %; 3 – 40 % ВК-6

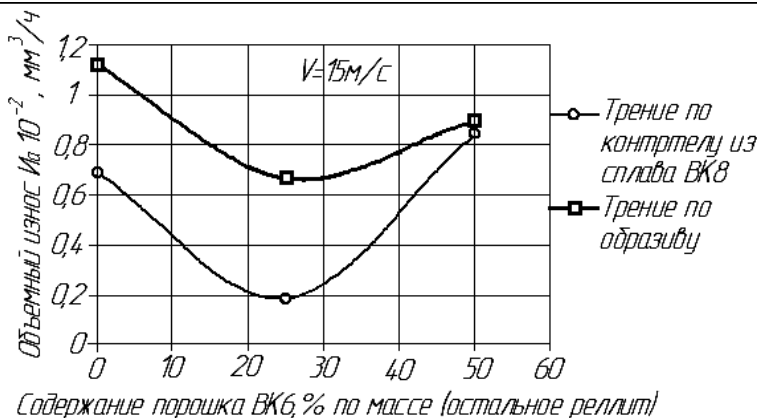


Рис. 2. Зависимость объемного износа композиционного материала от состава упрочняющей фазы (связующая фаза – медно-никелевый сплав (состав: 79 % (по массе) Cu + +20 % Ni + 1%P) (по данным [5])

упрочняющей фазы размером менее 0,1 мкм, искусственно введенные в материал на одной из технологической стадий. Объемная доля этих частиц (включений) составляет 0,1-15%. В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений, а также интерметаллических соединений.

Псевдосплавы представляют собой КМ, состоящие из двух или более металлических либо металлоподобных фаз, не взаимодействующих или слабо взаимодействующих. В отличие от армирования КМ, все структурные составляющие псевдосплавов в недеформированном состоянии имеют форму, близкую к равноосной. Псевдосплавы могут иметь матричную или каркасную структуру. Псевдосплавы с матричной структурой обычно отличаются от ДКМ большим размером упрочняющих включений (более 1,0 мкм) и большей концентрацией этих включений. Псевдосплавы с каркасной структурой имеют специфическое строение, характерное для пористых тел, пропитанных жидким металлом. Структуру таких материалов можно рассматривать как два взаимопроникающих непрерывных каркаса. Их получают методом пропитки [2].

**2 Определение оптимального состава износостойкого композиционного материала**

Проведенный анализ показывает, что для изготовления узлов трения деталей машин в большинстве случаев используются изготовленные методом порошковой металлургии композиционные материалы, относящиеся к группе псевдосплавов, состоящие из частиц упрочняющей фазы и матрицы, обладающей антифрикционными свойствами. В качестве упрочняющей фазы используют дисперсные частицы оксидов, карбидов, нитридов, боридов и других тугоплавких соединений, а также интерметаллических соединений [4, 5, 14, 6, 7, 13, 22, 21]. В качестве матрицы используются медь, никель, кобальт, молибден, их сплавы.

Соотношение между упрочняющей фазой и матрицей композиционного материала определяется исходя из требуемой износостойкости, прочности, твердости, антифрикционных характеристик. Изнашивание композиционного материала происходит в основном по матрице, поэтому увеличение доли упрочняющей фазы должно способствовать росту твердости и износостойкости композита. Однако при этом пластичность композита, прочность его при изгибе понижается, возможно, увеличение коэффициента трения, который зависит от количества связующей фазы. Также от количества связующей фазы зависит теплоотвод от поверхности трения. Дальнейшее повышение износостойкости композиционных материалов, состоящих из упрочняющей и связующей фаз, в

условиях абразивного изнашивания возможно за счет одновременного увеличения его твердости и пластических свойств [9, 10, 12, 14, 15].

Анализ показывает, что для композиционных материалов, работающих в условиях абразивного изнашивания, используются следующие соотношения между упрочняющей и связующей фазами:

- упрочняющая фаза – 70- 78 объемных процентов; связующая фаза – 22-30 объемных процентов [6,14].

Данные соотношения приняты за основу для дальнейших исследований, будут уточняться, и оптимизироваться в ходе проведения экспериментов, исходя из обеспечения максимальной износостойкости.

Разные коэффициенты линейного расширения упрочняющей и связующей фаз приводят к возникновению в композите остаточных напряжений после спекания или пропитки. Данные напряжения оказывают влияние на прочность и износостойкость композита. С увеличением сжимающих остаточных напряжений в связующей фазе увеличивается ее прочность, а значит и износостойкость композиционного материала [16]. Для определения зависимости остаточных напряжений, возникающих в зернах упрочняющей фазы и прослойках связки, разработана математическая модель напряженного состояния композита [4].

В качестве упрочняющей фазы композиционных материалов, работающих в узлах трения при наличии абразива, применяют релит (эвтектический сплав  $W_2C+WC$ ), керметы ТН-20, ТН-25, ТН-30, ТН-40, дибориды титана - хрома ( $Ti, CrB_2$ ), карбида хрома  $Cr_3C_2$ , карбид титана  $TiC$ , цианид титана  $Ti(Cn)$  [10, 12], карбиды и бориды других тугоплавких металлов.

Сплавы на основе карбида вольфрама при твердости, близкой к сплавам на основе карбида хрома, отличаются существенно большей износостойкостью, что можно объяснить пониженными прочностными характеристиками карбида хрома  $Cr_3C_2$ [1].

Для упрочняющей фазы разрабатываемого композиционного материала используют релит (эвтектический сплав  $W_2C+WC$ ) либо его смесь с порошком твердых сплавов типа ВК, состоящих из карбида вольфрама и кобальта. Композиционный материал с данной твердой фазой обладает наибольшей износостойкостью в условиях абразивного изнашивания [4, 5, 14].

Важным вопросом является размер зерен упрочняющей фазы, т. к. от этого зависят такие стереологические параметры композита, как средний размер участков связующей фазы, степень смежности зерен упрочняющей фазы, что в свою

очередь определяет износостойкость и прочность композиционного материала [16-19].

Наибольшей износостойкостью обладают композиции с наполнителем зернистостью карбида вольфрама 0,15...0,28 мм, повышение размера зерен перестает существенно влиять на износостойкость композита.

В работах [4, 15] исследовалась зависимость относительной износостойкости композиционного материала от состава упрочняющей фазы, которая состояла из релита зернистостью 0,1...0,4 мм и тонкодисперсного порошка твердого сплава ВК6 (состоит из карбида вольфрама WC - 94% по массе и кобальта Co - 6% по массе). При смешении зернового релита с тонкодисперсным порошком ВК6 до 40%, относительная износостойкость композита возрастает (рис. 1).

Аналогичные исследования проводились в работе [5], где исследовался износ композиционного материала от состава шихты (рис. 2). Для экономии релита возможно применять более износостойкую матрицу.

Предлагаются следующие составы упрочняющей фазы: релит (WC+W<sub>2</sub>C) зернистостью 0,15 - 0,28 мм (содержание в шихте в пределах – 60-80%) и тонкодисперсный порошок карбид вольфрама – кобальт (ВК-6) зернистостью около 0,002 мкм (содержание в шихте – 40-20%) [4].

Данные составы необходимо принять за основу при определении состава упрочняющей фазы, а затем оптимизировать по условию максимальной износостойкости с учетом таких стереологических параметров как средний размер участков связующей фазы, степень смежности зерен упрочняющей фазы.

### 3 Технология изготовления композиционного материала

Композиционные материалы, относящиеся к псевдосплавам и состоящие из частиц упрочняющей фазы и матрицы, изготавливают методом порошковой металлургии. Основными технологическими операциями изготовления деталей с композиционным материалом являются:

- изготовление стальных заготовок с глухими отверстиями для размещения порошка композиционного материала;
- приготовление шихты;
- прессование;
- спекание (пропитка) композиционного материала;
- механическая обработка.

Разрабатываемый композиционный материал предполагается [4,5] изготавливать пропиткой. При пропитке происходит заполнение пор спрессованной шихты из тугоплавкого компонента (упрочняющая фаза) расплавом легкоплавкого компонента (матрица). Пропитка должна производиться в вакууме, восстановительной (водород, углекислый газ) или нейтральной (аргон) атмосфере. Важной задачей является исследование возможности проведения пропитки под слоем флюса или с использованием самофлюсующихся порошков в качестве матрицы композиционного материала. Для нагрева могут применяться электрические печи различного конструктивного исполнения.

Пропитка производится методами полного или частичного погружения пористой заготовки в расплав либо путем наложения пропитывающего брикета на заготовку. В нашем случае используется напрессовка порошка или наложение мелких кусочков сплава матрицы на спрессованные частицы упрочняющей фазы.

Самопроизвольное протекание пропитки осуществляется при условии, что коэффициент смачивания  $\cos\theta_C > 0$ . Температура пропитки превышает точку плавления легкоплавкой фазы и не достигает точки плавления тугоплавкой. Кинетика пропитки в изотермических условиях описывается уравнениями

$$l_{np}^2 = k_{np} t,$$

$$k_{np} = \sigma_{ЖГ} \cdot \cos\theta_C \cdot r_{ЭФ} / 2\eta,$$

где  $r_{ЭФ}$  – эффективный радиус открытых пор,  $l_{np}$  – глубина пропитанного слоя,  $t$  – время,  $k_{np}$  – константа скорости пропитки,  $\sigma_{ЖГ}$  – межфазное натяжение на границе раздела жидкость-газ,  $\eta$  – динамическая вязкость жидкости,  $\theta_C$  – краевой угол смачивания.

Скорость пропитки растет при увеличении исходной пористости пропитываемых заготовок, размера пор и температуры процесса. О глубине пропитки за время  $t$  обычно судят по изменению массы  $\Delta m$  пропитываемой заготовки, коснувшейся расплава поверхностью  $F$ :

$$l_{np} = \Delta m / (F \cdot \Pi_1 \cdot \gamma),$$

где  $\Pi_1$  – пористость заготовки;  $\gamma$  – плотность расплава.

Взаимная растворимость компонентов отрицательно влияет на свойства пропитанного материала. Поэтому при наличии растворимости пропитку следует проводить в течение минимального времени, достаточного для заполнения пор. В случае не взаимодействующих фаз необходимо делать выдержку при пропитке для гомогенизации образовавшихся псевдосплавов.

Микроструктура псевдосплавов, полученных пропиткой, представляет собой взаимопроникающие непрерывные каркасы из тугоплавкой и легкоплавкой фаз.

Механическая обработка наплавленной заготовки выполняется на металлорежущих станках (токарных, фрезерных и шлифовальных) с получением детали согласно чертежу.

### 4 Применение износостойких покрытий в узлах трения гидромашины

Контактные кольца с износостойкой рабочей поверхностью нашли применение в качестве пар трения торцовых уплотнений нефтяных и водяных насосов, применяемых в системе промыслового сбора, транспорта нефти, поддержания пластового давления, а также радиальных и осевых опор скольжения многоступенчатых центробежных секционных насосов.

На основе колец с износостойкой рабочей поверхностью разработан унифицированный узел уплотнения валов нефтяных насосов магистральных трубопроводов (рис. 3). Разработано торцовое уплотнение вала с защитой, исключающей выброс нефти в насосное помещение при износе или разрушении колец основной пары трения торцового уплотнения [5].

Торцовое уплотнение выполнено в виде моноблока и включает унифицированный узел уплотнения, позволяющий устанавливать его на насосах серии "НМ". Защита от выброса нефти в насосное помещение имеет дополнительную гидравлически разгруженную контактную пару трения. При допустимых утечках или отсутствии утечки через основную рабочую пару трения торцового уплотнения, кольца резервной (стояночной) пары трения раскрыты, не имеют контакта. Возможная допустимая протечка нефти проходит через торцовую щель. Нарушение герметичности основной парой трения с утечкой уплотняемой среды, превышающей допустимые значения, резервная пара под давлением замыкается. Датчик давления в корпусе уплотнения отключает насосный агрегат. Резервная (стояночная) пара трения обеспечивает герметичность выхода вала из корпуса насоса до полной остановки насосного агрегата и закрытия задвижек на входе и выходе насоса.

Широкое применение в нефтяной промышленности получили секционные центробежные насосы типа «ЦН» и «ЦНС», которые осуществляют перекачку нефти и закачку в нефтяной пласт технических и промысловых минерализованных сточных вод.

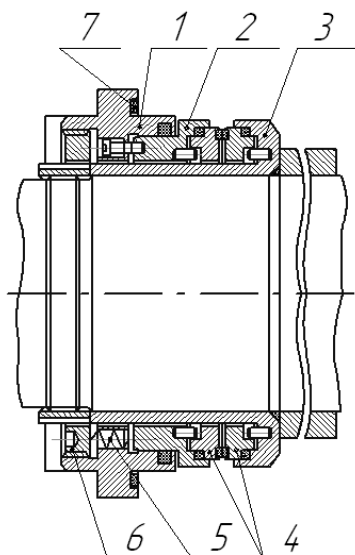


Рис. 3. Одинарное торцовое уплотнение: 1 – корпус уплотнения; 2 – аксиально-подвижный узел; 3 – гильза вала; 4 – контактные кольца; 5 – пружины; 6 – регулировочная гайка; 7 – эластичные уплотнительные кольца

Эксплуатация насосного оборудования на сточных водах связана с их интенсивным разрушением. Наблюдения за работой насосов показывают, что межремонтный период секционных насосов при закачке сточных вод сократился в 2,5 - 3 раза по сравнению с насосами, работающими на пресной воде.

Надежность работы центробежных насосов в немалой степени зависит от состояния межступенчатых уплотнительных устройств, гарантированная величина щелей которых должна быть 0,17-0,22 мм, и долговечности гидравлического разгрузочного устройства.

Износ и разрушение щелевых уплотнений насоса при закачке в пласт сточных вод обусловлен следующими причинами: во-первых, щелевые уплотнения подвергаются воздействию гидроабразивной жидкости, протекающей по щели с высокой скоростью и содержащей довольно большое количество механических примесей,

Во-вторых, разрушение (коррозия) элементов уплотнений из-за агрессивности перекачиваемой среды.

В-третьих, механический износ щелевых уплотнений из-за вибрации ротора и неустойчивой работы вала насоса. Отсутствие динамической балансировки ротора в период сборки насоса, а также изменение формы и размеров рабочих колес во время работы насоса приводят к вибрации с амплитудой, превышающей размер щели. При вращении ротора элементы щелевых уплотнений соприкасаются между собой, усугубляя их износ.

Замер линейного износа рабочих поверхностей уплотнительных колец и ступиц рабочих колес, составляющих щелевые уплотнения центробежных насосов, выявил неравномерное распределение износа по ступеням [37].

Надежность работы секционных центробежных насосов типа ЦН 150 х 100 также во многом зависит от работоспособности узла разгрузки осевых сил. В процессе эксплуатации, особенно на сточных водах, контактные поверхности быстро изнашиваются, что ведет к недопустимым осевым смещениям ротора. Повышенный осевой сдвиг влечет к механическому разрушению рабочих колес, направляющих аппаратов, деталей лабиринтных уплотнений.

Наблюдения показывают [37], что в период до выхода насоса на капитальный ремонт разгрузочные устройства имеют суммарный износ рабочих поверхностей свыше 3-4 мм, причем, чем больше число остановок и пусков агрегатов, тем износ больше. Разгрузочные поверхности имеют следы

механического износа (борозды, задиры) и эрозионного разрушения (раковины, каверны), при этом диск подвержен износу больше, чем пята, особенно на сточных водах.

Для повышения надежности работы насосов, перекачивающих сточные воды, разработаны конструкции щелевого уплотнения (рис. 4), устанавливаемого в средней ступени, и разгрузочного устройства с рабочими поверхностями из твердосплавного композиционного материала ТМ-1, работающего в режиме избирательного переноса. Щелевое уплотнение средней ступени может работать как промежуточная радиальная опора.

Промежуточная опора (рис. 4) представляет собой уплотнительное кольцо 2, внутренняя поверхность которого выполнена из композиционного материала ТМ-1. В паре с кольцом работает разъемная ступица 3 рабочего колеса 1. Рабочая поверхность ступицы также выполнена из композиционного материала ТМ-1. Гарантированный рабочий зазор между уплотнительным кольцом в ступице равен 0,15-0,2 мм на сторону. Композиционный материал ТМ-1 наносится на ширине 25 мм.

Композиционный материал ТМ-1 обладает хорошей антифрикционностью, теплопроводностью, высокой твердостью и износостойкостью, что позволяет работать промежуточной опоре без схватывания при контактировании рабочих поверхностей уплотнительного кольца и ступицы рабочего колеса.

Такие свойства композиционного материала ТМ-1 предопределили его применение и для увеличения работоспособности узла разгрузки осевых сил насосов типа ЦН и ЦНС [37].

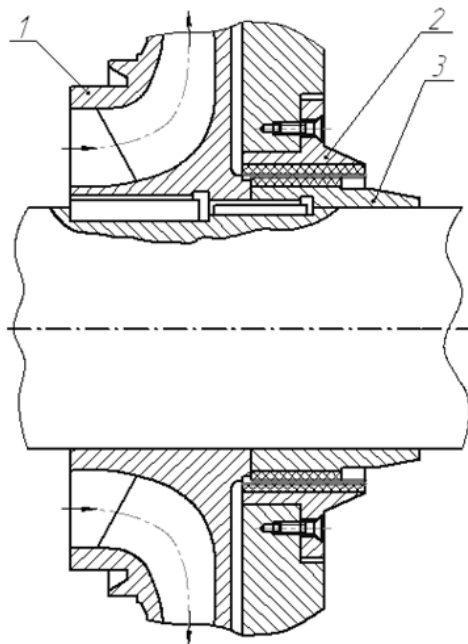


Рис. 4. Промежуточная опора центробежного насоса ЦН 150 х 100: 1 – рабочее колесо секционного центробежного насоса; 2 – уплотнительное кольцо (радиальная опора); 3 – разъемная ступица

Основные детали разгрузочного устройства: вращающийся диск 2 и неподвижная пята 1 (рис. 5). Рабочие (торцовые) поверхности этих деталей выполняются из композиционного материала ТМ-1. Применение такого узла гидравлической разгрузки, выполняющего роль осевой опоры, позволило существенно повысить работоспособность насосного агрегата.

#### **Выводы**

1. Узлы трения гидромашин являются сложными трибологическими системами, функционирующими в жестких экстремальных условиях. Важной проблемой повышения

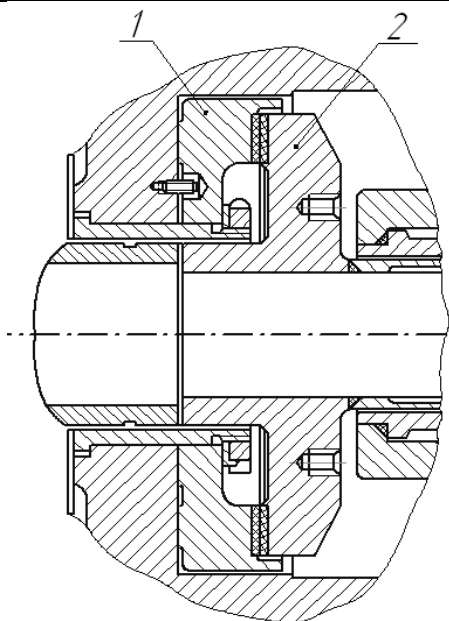


Рис. 5. Разгрузочный узел центробежных насосов ЦН и ЦНС:  
1 – гидравлическая опорная пята; 2 – разгрузочный диск

их надежности является дальнейшее развитие эффективных средств упрочнения поверхностных слоев трущихся деталей.

- Перспективным направлением повышения износостойкости деталей узлов трения гидромашин является применение спеченных композиционных материалов на основе порошков карбида вольфрама и медьсодержащей матричной связки.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Голуб М.В. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля. // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1986, вып. 1, с. 217-234.
- Композиционные материалы: Справочник / Под ред. Д. М. Карпиноса. - К.: Наук. думка, 1985. -592 с, ил.
- Васкул П.Н. Разработка новой композиции наплавочных сплавов применительно к абразивному изнашиванию. /Автореферат дисс. канд. техн. наук -М.: ГАНГ им. И.М.Губкина, 1995г. -21 с.
- Голуб М.В. Основы комплексного решения проблемы износостойкости, надежности и долговечности уплотнений насосов магистральных нефтепроводов. /Дисс. докт. техн. наук. -Брест, 1992.
- Голуб В.М. Повышение износостойкости и герметичности контактных колец пар трения торцовых уплотнений. / Автореферат кандидатской диссертации. Гомель, ИММС им. Белого НАН РБ, 2002 г. -22 с.
- А.С. 436881 (СССР) Металлокерамический антифрикционный сплав. Уфимский нефтяной институт. / Голуб М.В., Кагарманов Н.Ф., Кравцов В.И., Хамзин Ш.Х., Филин Е.А., Заявл. 12.05.1972 №1781492/22-1.
- Mechanical properties of molybdenum alloyed liquid phase sintered tungsten-based composites / Kemp Preston B., German Randall M. // Met. and Mater. Trans. A [Met. Trans. A]. -1995. - 26, № 8. -С. 1995-2187.
- Сплав для металлизации / Asano Ichiro, Hayashi Yoichiro, Manabe Isamu // Sumitomo Jukikai giho = Techn. Rev. -1996. -44, № 131. -С. 41-44. -Яп.

- Твердые сплавы WC-Co-Ni. /Пантелеев И.Б., Лукашова Т.В., Орданьян С.С. // Цветная металлургия. -1997. -№ 7. С. 70-73.
- Миронович Г.А., Ионкина Е. М. Исследование карбидохромовых твердых сплавов с никелидами алюминия в качестве связки. // Порошковая металлургия. - 1991.-№15.-С.35-39.
- Белый А.В., Миниевич А. А., Поболь И.Л. Физико-механические и триботехнические свойства покрытия (Ti, Al). N // Порошковая металлургия.-1991.-№15.-С. 102-105.
- Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов. - К.: Наук. думка, 1978. -184 с.
- Композиционные материалы: Справочник. / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; Под общ. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. - М.: Машиностроение, 1990. -512 с.
- Поляк М. С. Технология упрочнения. Технол. методы упрочнения. В 2 т. Т. 1. -М.: «Л.В.М. - СКРИПТ», «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1995. - 832 с.
- Голуб М.В., Харламенко В.И., Кагарманов Н.Ф., Кравцов А.И., Нургалеев Р.М. Создание твердосплавных антифрикционных материалов, работающих в режиме избирательного переноса. - В кн.: Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. - М., 1972. - 2 с.
- Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. - Киев.: Наук. думка, 1984. -328 с.
- Чапорова И. Н., Чернявский К. С. Структура спеченных твердых сплавов. - М.: Металлургия, 1975. - 248 с.
- Чернявский К. С. Стереология в металловедении. - М.: Металлургия, 1977.-280 с.
- Чернявский К. С. Травушкин Г. Г. Современные представления о связи структуры и прочности твердых сплавов WC - Co: Обзор // Проблемы прочности. - 1980. -№ 4. - С. 11-20.
- Справочник по пайке: Справочник/ Под ред. И. Е. Петрунина. - М.: Машиностроение, 1984. - 400 с.
- Харламенко В.И., Голуб М.В. Эксплуатация насосов магистральных нефтепродуктопроводов. – М.: Недра, 1978. – 281 с.
- Ермаков С.С., Вязников Н. Ф. Порошковые стали и изделия. - Л.: Машиностроение, 1990. - 319 с.
- А. С. 436881 (СССР) Металлокерамический антифрикционный сплав. Уфимский нефтяной институт и Башкирский научно-исследовательский проектный институт нефтяной промышленности. Автор изобретения М. В. Голуб и др. опубл. Б. И., 1974, №27
- А. С. 770246 (СССР) Композиционный материал на основе карбида вольфрама. Автор изобретения М. В. Голуб, В. Н. Малышев и др.
- Смагленко Ф. П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твердого сплава ВК15 //Пробл. прочности. -1980. - №8. -С. 35-38
- Резник Л. А. Износостойкость твердосплавного вооружения породоразрушающего инструмента при абразивном изнашивании и разработка ее оценки на основе энергетического критерия: Дисс. ... к. т. н. - М., 1988. - 113 с.
- Самсонов Г. В., Виноцкий И. М. Тугоплавкие соединения. - М.: Металлургия, 1976. - 560 с.
- Краткий справочник металлста / Под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. - М.: Машиностроение, 1987. - 960 с.
- Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984.-328 с.
- Смагленко Ф. П. Влияние распределения остаточных напряжений на усталостную прочность твердого сплава ВК15 //Пробл. Прочности. -1980. - №8. -С. 35-38.
- Краткий справочник металлста / Под общ. ред. П. Н. Орлова, Е. А. Скороходова. - М.: Машиностроение, 1987. - 960 с.

32. Новиков Н. В., Девик Л. И., Левитас В. И. Анализ напряженного состояния пластических прослоек между жесткими зёрнами // Сверхтвёрдые материалы. - 1980. - №2. - С. 16 – 23.
33. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов: Учебник для вузов. - М.: Наука, 1986. - 512 с.
34. Голуб М.В. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля. - Долговечность трущихся деталей машин. - М.: Машиностроение, 1985, вып. 1. - С. 217-234.
35. Голуб В. М., Плещачевский Ю.М. Износостойкие покрытия рабочих поверхностей колец пар трения торцовых уплотнений на основе разнозернистых порошков карбида вольфрама. // Материалы, технологии, инструменты, Т.6, №4, 2001. - С. 29-32.
36. Голуб М.В., Голуб В.М., Шаповал Ф.И. Методики оценки влияния температур уплотняемой среды на триботехнические характеристики.
37. Муслимов А.Ш., Голуб М.В., Харламенко В.И. и др. Применение износостойких композиционных материалов в узлах трения центробежных насосов. // Применение избирательного переноса в узлах трения машин, часть 1.-М., 1976. - С. 171-179.

Статья поступила в редакцию 18.10.2007

УДК 621.9.02.048

Клубович В.В., Рубаник В.В., Рубаник В.В. мл., Рубаник О.Е.

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В TiNi ВОЛНОВОДАХ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

**Введение.** Материалы и сплавы с памятью формы (СПФ) привлекают все большее внимание с момента обнаружения и первой публикации об эффекте памяти формы Чангом и Ридом в 1951 году [1]. Эти материалы обладают чрезвычайно большими восстанавливаемыми деформациями (порядка 10 %) неупругой природы. Удивительная способность полностью возвращать большие деформации – результат термоупругого фазового превращения низкотемпературной мартенситной в высокотемпературную аустенитную фазу. Именно это свойство позволяет использовать СПФ во многих инновационных технических решениях [2]. В настоящее время СПФ применяют в качестве силовых приводов, материала для вживляемых стержней Харрингтона для коррекции сколиоза, ортодонтических дуг, способных к поддержанию постоянного уровня нагрузки даже после больших деформаций, композитных систем с интегрированными волокнами, исполняющими функции привода датчиков в специальных сложных системах для активного управления динамическим и структурным поведением.

Ультразвуковое воздействие на металлы и сплавы в большинстве случаев вызывает неравномерный разогрев материала [3], температура может достигать даже точки плавления [4]. В первую очередь процесс нагрева связан с демпфирующими свойствами материала, мощностью вводимых ультразвуковых колебаний (УЗК). Так, при воздействии УЗК в течение 20 секунд образцы из стали, меди, латуни нагреваются на 100±200 К, алюминиевые образцы – всего на 5+10 К в узлах смещений [5]. Максимум температуры при этом приходится на пучности механических напряжений. В нерезонансных образцах разогрев наблюдается в месте его крепления к концентратору.

Учитывая, что в сплавах с эффектом памяти формы при реализации термоупругого фазового перехода происходит максимальное проявление демпфирующих свойств [6], следует ожидать максимального поглощения энергии акустических колебаний в температурном интервале превращения. В этой связи целью настоящей работы является исследование кинетики разогрева и распределения температуры по длине TiNi волновода в процессе ультразвукового воздействия.

**Методика и результаты исследований.** Исследования проводили с помощью тепловизора Thermo Tracer TN9100, представляющего собой бесконтактную высокочувствительную инфракрасную камеру. Спектральный диапазон измерений составлял от 8 до 14 мкм. Для возбуждения в образцах УЗК использовали ультразвуковой генератор с автоматической подстройкой резонансной частоты УЗГ4-У-44 с пьезокерамическим преобразователем, разработанный и изготовленный в БГУИР. Полоса рабочих частот генератора 40...50кГц; диапазон удержания частоты системой ±2кГц; максимальная выходная электрическая мощность 100 Вт.

Генератор имеет встроенную систему автоматического поддержания резонансной частоты, благодаря которой обеспечивалась работа излучателя в резонансном режиме даже при значительном изменении параметров нагрузки и собственной резонансной частоты присоединенных волноводов. Цилиндрический образец (волновод) диаметром 10 мм и длиной 80 мм крепился к концентратору с помощью резьбового соединения. Частота возбуждаемых колебаний непрерывно фиксировалась частотомером ЧЗ-33 и бесконтактным вибротомером БВУ-3М. Тепловизионная камера располагалась на расстоянии 30 см от волновода так, что позволяла наблюдать на мониторе весь образец и конец ультразвукового концентратора.

Тепловизионное исследование ультразвукового разогрева TiNi волноводов показало, что в образцах резонансной длины в процессе воздействия ультразвука максимальный нагрев наблюдается в узлах смещений и минимальный – в пучностях смещений механических колебаний (рис. 1). Перепад температуры по длине образца в процессе его нагрева за счет поглощения энергии УЗК составляет до 20°C. В аустенитном состоянии УЗК не вызывали дальнейшего разогрева волновода и распределение температур вдоль образца стабилизируется, что обусловлено более низким уровнем внутреннего трения, характерного для TiNi в аустенитном состоянии по сравнению с мартенситным и двухфазным. Диссипация акустической энергии в аустенитном состоянии практически не происходит. Однако с течением времени неоднородность распределения температуры по длине образца сохраняется. На гистограмме распределения температуры по поверхности образца (рис. 2) наблюдается два явно выраженных пика, которые сохраняются в процессе ультразвукового разогрева.

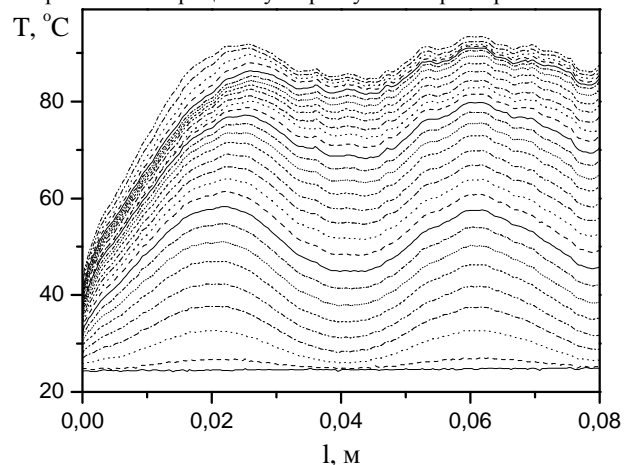


Рис. 1. Профили распределения температуры по образцу с интервалом в 5 с при ультразвуковом нагреве