

Рис.1. Зависимость микротвердости плазменных и детонационных покрытий от состава упрочняющей фазы.

поверхностной зоне покрытия. Рассмотрим особенности микроструктуры всех напыленных слоев в направлении от границы раздела со сталью к свободной поверхности покрытия. Состояние границы раздела покрытий с подложкой во всех вариантах составов монолитное, поры отсутствуют. Микротвердость границы раздела возрастает при переходе от CrB<sub>2</sub> (260 – 487 кг/мм<sup>2</sup>), TiB<sub>2</sub> (286 - 340 кг/мм<sup>2</sup>) к (TiCr)B<sub>2</sub> (412 - 429 кг/мм<sup>2</sup>), достигая максимального значения в детонационном покрытии (891-946 кг/мм<sup>2</sup>). Объяснением этого являются распределение твердых зерен в покрытии и их взаимодействие со сплавом основы. В детонационном покрытии частицы упрочняющего компонента расположены непосредственно на границе раздела с основным металлом, тогда как при оплавлении плазменнонапыленных покрытий между этими зонами формируются, как правило, один или два промежуточных слоя. Кроме того, большую роль в снижении микротвердости приграничной зоны в последнем случае играет диффузия железа из материала подложки.

**Выводы.** Реализованы плазменный и детонационный способы нанесения покрытий с высокой адгезионной прочностью и плотностью на детали машин. Проведены уравнения физических покрытий с покрытиями, полученными газопламен-

ным напылением с применением гибких шнуровых материалов. Изучены сложные структуры покрытия на основе стеллита марки ПГ-10-К-01с с тугоплавкими добавками. Выявлено, что покрытие имеет многослойную структуру.

Определены микротвердости различных покрытий, даны рекомендации по выбору оптимального состава покрытий. Полученные результаты исследований подтверждают высокое качество покрытий.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Борисов Ю.С. Современные тенденции в развитии газотермического напыления покрытий //Тр. 5-й Международной конф. «Пленки и покрытия-98» /Под ред. В.С.Клубникина,1998. – С. 14-19.
2. Цветков Ю.В. Плазменная металлургия – перспективная технология XXI века /Металлы. 2001. № 5. – С. 24-31.
3. Харламов Ю.А. Газотермическое напыление покрытий и экономичность производства, эксплуатации и ремонта машин //Тяжелое машиностроение. 2000. №2. – С.10-13.
4. А.С. № 548177. Установка для детонационного нанесения покрытий. Зверев А.И., Бондаренко А.С., Пудзинский М.А. и др. 1986. Бюл. № 44.

Статья поступила в редакцию 29.10.2007

УДК 621.762

Пантелеенко Е.Ф.

## МОРФОЛОГИЯ И СВОЙСТВА ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ

**Введение.** Борированные стальные и чугунные порошки используются для упрочняюще-восстановительных технологий и обладают рядом преимуществ [1]. Это самофлюсующесть, возможность управлять свойствами формируемых из

них покрытий, высокая износостойкость получаемых покрытий. В зависимости от фракции ДЛП, для их нанесения можно применять широкий спектр технологий. Порошки фракции до 50 мкм используются для детонационного напыления, сущно-

Пантелеенко Екатерина Федоровна, аспирант Белорусского национального технического университета. Беларусь, БНТУ, 220107, г. Минск, пр. Партизанский, 77.

стью которого является использование энергии детонационных волн для нагрева и ускорения частиц порошка напыляемого материала. Физико-механические и эксплуатационные свойства детонационных покрытий намного превышают соответствующие показатели для покрытий, получаемых методом газопламенного и плазменного напыления, для которых используются порошки фракции 50 – 160 мкм, однако оборудование для данного технологического процесса дороже. Фракция 100 – 315 применяется для восстановления и упрочнения деталей методами наплавки или электроконтактной приварки; 200 – 800 мкм – для магнитно-электрического упрочнения (МЭУ).

Традиционно, самофлюсующиеся порошки, или так называемые самофлюсы, производятся из сплавов на основе никеля и кобальта. Однако эти порошки достаточно дороги, поэтому их применение ограничивается узкой номенклатурой деталей. Диффузионно-легированные порошки на основе стали или чугуна являются более дешевыми, и их применение наиболее выгодно и широко распространено.

Покрытия их ДЛСП исследуются и применяются в промышленности достаточно давно, поэтому существует большое количество научно-исследовательских работ, посвященных данной теме. В частности, такие работы, как [2], посвящены изучению процессов плазменного напыления ДЛСП на железной основе, [3] – вопросу получения плазменных наплавленных покрытий. Технологии лазерного термоупрочнения самофлюсующимися сплавами на железной основе и повышения износостойкости рабочих поверхностей пар трения посвящена работа [4]. В работе [5] рассматриваются вопросы разработки самофлюсующихся наплавочных материалов на железной основе и защитных покрытий из них. Вопросы МЭУ ДЛСП порошков на основе стали рассмотрены в работе [5]. Однако применение чугунных отходов для этих целей не нашло отражения.

**Целью** данной работы является исследование гранулометрического состава, морфологии, структуры и технологических свойств исходных порошков и ДЛСП из чугунных отходов производства, кинетической зависимости толщины борированного слоя от времени и температуры ХТО, износостойкости покрытий из порошков, подвергнутых ХТО на разных режимах.

**Методика исследований.** Гранулометрический состав исследовался с помощью просеивания в стандартном наборе сит, после чего каждая фракция взвешивалась, и, согласно полученным результатам, строился график. Морфологию порошков исследовали с помощью спектрального электронного микроскопа Vega II LMU с микроанализатором. Микрошлифы изготавливались по ГОСТ 9.302 – 88. Образцы порошков заливали эпоксидной смолой в металлических обоймах, шлифовали, полировали пастой ГОИ. Для травления использовали 4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Фотографии структуры частиц получали на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ-1. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 20г.

Ежегодно в отечественном машиностроении образуются сотни тонн отходов производства стальной и чугунной дроби. Подвергнув диффузионной обработке этот почти готовый сферический порошок, можно получить гораздо более дешевые самофлюсующиеся материалы для восстановительно-упрочняющих технологий, чем их зарубежные аналоги.

В данной работе исследовали гранулометрический состав отходов производства дроби из стали 40Л и белого ваграночного чугуна. Результаты приведены на рис.1. В обоих случаях литая дробь содержит большее количество фракции свыше 315 мкм. При получении колотой дроби увеличивается количество более мелких фракций. Таким образом, график гранулометрического распределения колотой дроби в обоих случа-

ях сдвигается влево относительно графика литой. Порошок из стали 40Л и порошок из белого чугуна содержат достаточно большое количество фракций, которые подходят для таких видов восстановления и упрочнения деталей, как наплавка, электроконтактная приварка и магнитно-электрическое упрочнение, т.е. частиц диаметром 200 – 630 мкм. Чугунный порошок имеет более равномерное распределение в диапазоне размеров от 100 до 315 мкм и от 200 до 630 для колотой и литой соответственно. В то же время график распределения фракций порошка из стали 40Л имеет только один ярко выраженный пик: фракции 400-630 и 200-315 мкм для литой и колотой соответственно.

Способ получения порошка обуславливает большую степень его сфероидизации, что в свою очередь влияет на такой немаловажный технологический показатель, как текучесть. Степень сфероидизации порошка из стали 40 Л составляет приблизительно 96-99%. Степень сфероидизации порошка из белого чугуна меньше – около 70 %. Такое отличие очевидно объясняется разными технологическими схемами получения дроби в условиях различных предприятий - производителей.

В целом для МЭУ годится порошок с размером частиц 200 – 700 мкм. Для порошка из стали 40Л нами уже были исследованы закономерности диффузионного легирования и структурообразования. Изучена микроструктура частиц исходного порошка и подвергнутого ХТО на разных режимах, исследовано распределение микротвердости по сечению борированных частиц. Из полученного порошкового материала методом магнитно-электрического упрочнения созданы и испытаны на износостойкость гетерогенные покрытия. [6, 7] В данной работе более детально исследовался порошок, изготовленный из белого чугуна, фракции 200-315 мкм, так как, исходя из полученного гранулометрического распределения, она составляет наибольшую массовую долю всего порошка и в наибольшей степени пригодна для магнитно-электрического упрочнения.

Исследование микроструктуры исходного порошка показывает наличие в нем различных дефектов, таких как пористость, внутренние и околоповерхностные трещины. Такие дефекты при дальнейшей ХТО ускоряют процессы диффузионного насыщения бором. Большинство частиц имеет классическую структуру белого доэвтектического чугуна. Структура околоповерхностных областей некоторых частиц представляет собой ледебурит с включениями цементитных пластин – белые области с микротвердостью до 3 400 Н/мм<sup>2</sup>. Микротвердость же дендритных включений перлита меньше и составляет в среднем 2 000 Н/мм<sup>2</sup>. Дисперсность дендритных включений перлита в различных частицах отличается, что обусловлено разной скоростью охлаждения частиц. Кроме частиц с классической структурой доэвтектического белого чугуна изредка встречаются частицы, имеющие заэвтектическую структуру – ледебурит + первичный цементит в виде пластин, что вызвано некоторой сегрегацией расплава по углероду.

Вопросами борирования сталей и чугунов занимаются достаточно давно, однако большинство авторов посвящают свои работы борированию макрообъектов.[8] В то же время существуют некоторые различия и особенности борирования микрообъектов, т.е. порошков. В данной работе химико-термической обработке при разных режимах подвергался порошок сферической формы фракций 100-160 и 200-315 из белого чугуна. Борирование проводилось в среде карбида бора дисперсностью 50 – 160 мкм с добавлением в качестве активатора 1% AlF<sub>3</sub>. Соотношение насыщающей и насыщаемой сред выбрали оптимальным согласно [1] – 4:1. Смесь помещали в контейнер из жаропрочной стали, герметизировали при помощи плавкого затвора и помещали в нагретую лабораторную электропечь SNOL 7,2/1100. После окончания ХТО, контейнер охлаждали на воздухе, вскрывали плавкий затвор и производили сепарацию борированного порошка с помощью ситового метода, а также магнитной сепарации.

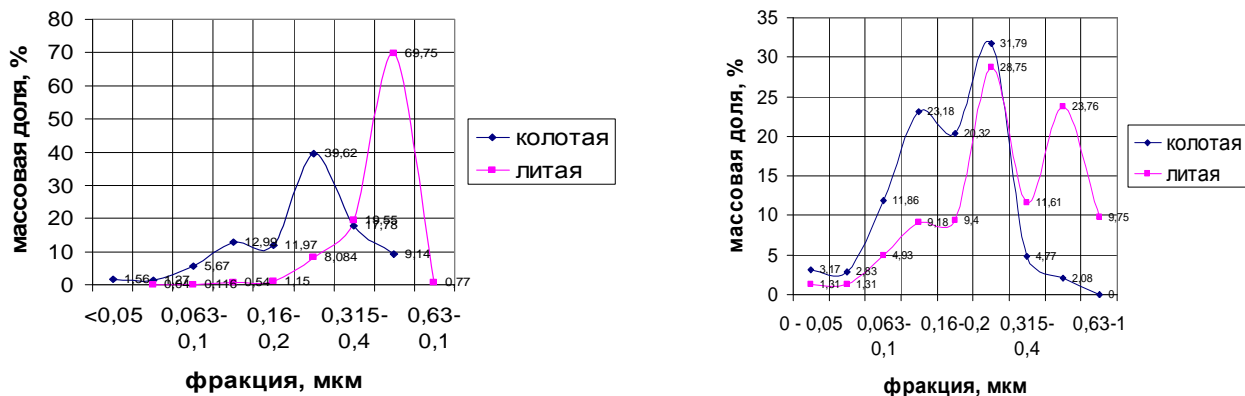


Рис. 1. Гранулометрический состав отходов производства дроби из стали 40 Л (а) и белого ваграночного чугуна (б)

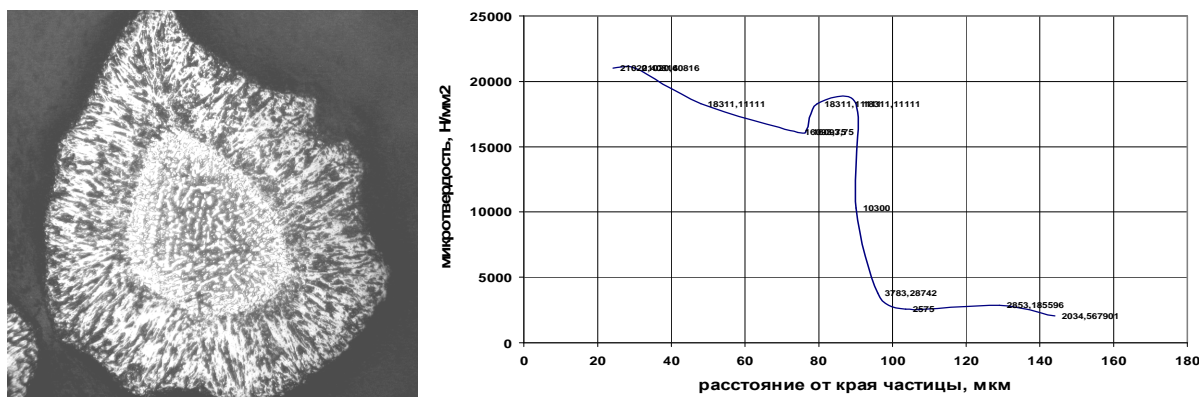


Рис. 2. Распределение микротвердости в частице

Химико-термическая обработка проводилась при температурах 850, 900 и 950 °С в течение 1, 1.5, 2, 3, 4 часов.

Известно, что чем больше содержится углерода в бориромом сплаве, тем медленнее происходит процесс диффузионного насыщения, причем в процессе роста боридного зерна происходит отгеснение углерода от поверхности вглубь частицы. Чем больше углерода содержит сплав, тем менее выраженной получается классическая игольчатая структура борированного слоя – боридные иглы укрупняются, а концы их скругляются [9]. В данном случае содержание углерода в чугуне составляет 2,8 – 3%, т.е. настолько велико, что граница боридного фронта полностью сглаживается и ярко выраженных боридных игл не наблюдается. Непосредственно к иглам боридов должны примыкать перистые выделения карбоборидной фазы.[9] Точно идентифицировать границу между боридным и переходным слоем можно по данным измерения микротвердости и МРСА. Об отгеснении углерода вглубь частицы свидетельствует также наличие белого слоя в подборидной области (рис. 2). Очевидно, что это цементит, возможно, с присутствием бора, т.е. карбобориды. Это подтверждается и измерением микротвердости, которая в так называемом «подборидном» слое достигает 10 000 Н/мм<sup>2</sup>, в то время, как в центре частицы равна 2 500 – 3000 Н/мм<sup>2</sup>. Исследование микроструктуры показало, что в сердцевине некоторых частиц после борирования обнаруживаются хлопьевидные или близкие по форме к сферическим включения. Предположительно в частицах при ХТО происходит графитизация, и это включения графита. Структура ядра обработанной частицы представляет собой структуру белого чугуна, однако в «подборидной» зоне повышено количество цементита, встречаются обособленные его включения, а по мере дальнейшей выдержки идет графитизация.

Исследование морфологии частиц исходного и борированного порошка с помощью растрового электронного микроскопа показывает, что после ХТО на поверхности частиц происходит появление сглаженных выростов и выступов неправильной конической или призматической формы. Как известно, существует эффект увеличения размеров частиц после борирования. Очевидно, кристаллы боридов растут не только вглубь частицы, но и наружу. Также на поверхности обработанных частиц наблюдаются трещины, причем их количество тем больше, чем больше время ХТО. Это происходит, по-видимому, из-за возникающих растягивающих, преимущественно в фазе FeV, и сжимающих (в фазе Fe<sub>2</sub>V) напряжений [10].

В данной работе также было исследовано распределение микротвердости по сечению частицы. Высокобористая фаза FeV имеет высокую твердость – около 22 000 Н/мм<sup>2</sup>, однако она очень хрупкая и при изготовлении шлифа может выкрашиваться, вследствие чего борированный слой, наблюдаемый на микроскопе, пористый. Поскольку оболочка частиц имеет большую пористость, то для измерений были выбраны частицы с борированным слоем толщиной около 80 мкм, так как при более тонком слое измерения были бы затруднены. Результаты измерения распределения микротвердости приводятся на рис.2. Полученные результаты подтверждают общеизвестный факт, что снаружи располагается область боридов – химических соединений бора с железом: в наружной области борированного слоя располагаются более твердые соединения FeV, затем Fe<sub>2</sub>V; далее переходная зона твердого раствора бора в железе – карбоборидов, далее следует подборидный слой с отгесненным в него углеродом – микротвердость незначительно возрастает, затем мягкая сердцевина [9].

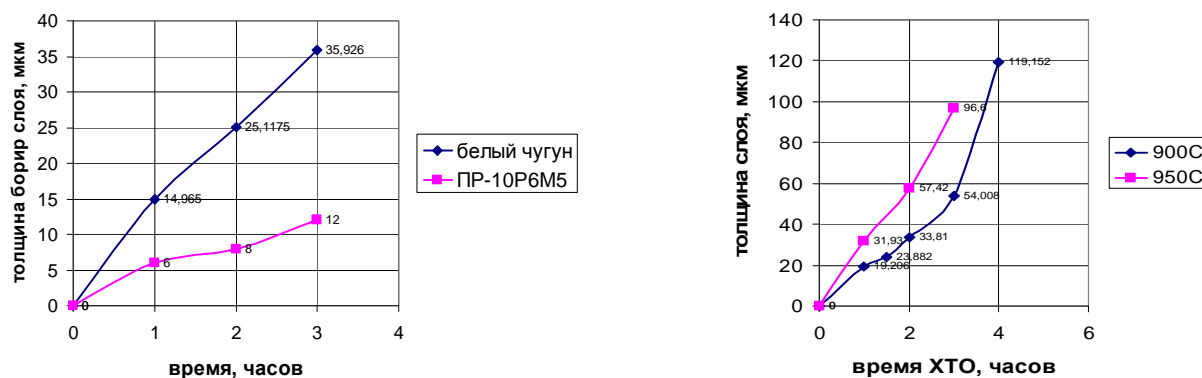


Рис. 3. Зависимость толщины диффузионного слоя от времени обработки: а) частицы белого чугуна и ПР-10Р6М5 дисперсностью 100-160 мкм при 900<sup>0</sup>С; б) частицы БЧ дисперсностью 200 – 315 мкм при 900 и 950<sup>0</sup>С

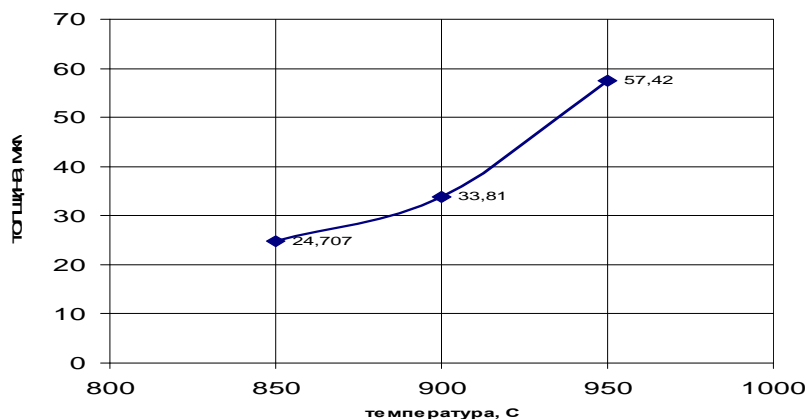


Рис. 4. Зависимость толщины борированного слоя порошка фракции 200-315 мкм при ХТО в течение 2 часов при разных температурных режимах

Множество проведенных режимов химико-термической обработки порошков двух фракций (100 – 160 мкм и 200 – 315 мкм) из белого чугуна позволяет выявить некоторые закономерности, которые позволяют получать самофлюсующиеся диффузионно-легируемые порошки с заданным содержанием бора. Если сравнивать результаты с ХТО стального порошка ПР-10Р6М5, приводимыми в источнике [1], то при равных технологических условиях диффузионное насыщение исследуемого порошка происходит в 2 – 3 раза быстрее. Типы активаторов – NaF (в случае ПР-10Р6М5) и AlF<sub>3</sub> (для исследуемого порошка) – по своему воздействию на процесс диффузии почти одинаковы. Казалось бы, что в исследуемом порошке в 2,5 – 3 раза больше углерода и диффузия должна быть более медленной. Очевидно, такое несоответствие объясняется следующим: во-первых, порошок ПР-10Р6М5 насыщают одновременно и бором и кремнием; во-вторых, ПР-10Р6М5 содержит легирующие элементы, которые могут замедлять процесс диффузии (3,8% Cr, 6% W, 5% Mo, 0,4% Ni, 1,72 – 1% V, 0,5% Si, 0,4% Mn); в-третьих, исследуемый порошок белого чугуна содержит большое количество дефектов, вследствие поверхностной диффузии ускоряющих процесс борирования, а также имеет неравновесную структуру. На приведенном ниже графике зависимости толщины слоя от времени обработки для сравнения отображена зависимость толщины диффузионного слоя при борсилцировании ПР-10Р6М5 при температуре 900<sup>0</sup>С.

Химико-термическая обработка порошка дисперсностью 200-315 мкм проводилась при температурах 900 и 950<sup>0</sup>С в течение 1, 1.5, 2, 3 и 4 часов. Показано, что наиболее быстрый рост толщины диффузионного слоя наблюдается при больших температурах ХТО. При увеличении температуры ХТО

на 50 градусов интенсивность диффундирования повышается в 1,5 – 2 раза. Следует отметить, что графики зависимости толщины диффузионного слоя от технологических параметров не соответствуют классическим экспоненциальному и параболическому законам. Это обусловливается спецификой ХТО микрообъектов, воздействием углерода, препятствующим проникновению бора в частицу и сокращающимся фронтом диффузии. [6]

Получена еще одна кинетическая зависимость – толщины диффузионного слоя от температуры ХТО. Борирование порошка фракции 200-315 мкм проводилось в течение 2 часов при температурах 850, 900 и 950<sup>0</sup>С. Зависимость приводится на рис.4.

Необходимо отметить, что при прочих равных условиях скорость роста диффузионного слоя в частицах крупной фракции (200 - 315 мкм) больше, чем в частицах более мелкой (100-160 мкм). Это обуславливается меньшим фронтом диффузии в более мелких частицах, а, следовательно, требуется больше времени для преодоления углеродного «барьера», при оттеснении последнего вглубь частицы.

Таким образом, в данной работе на основе проведения ряда режимов химико-термической обработки порошка из отходов производства чугуна, изучена структура исходного и обработанного при различных технологических условиях порошков, получены кинетические зависимости роста диффузионного слоя от времени и температуры ХТО, изучена микроструктура получаемых порошковых материалов, микротвердость. Исследование данных закономерностей позволяет получать порошки для создания защитных, восстановительных и упрочняющих покрытий с заданными свойствами при помощи различных методов наплавки, напыления, маг-

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 дробы позволяет прийти к **выводам**:

1. По гранулометрическому составу свыше 70% отходов производства чугунной дробы 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.*