

РАЗРАБОТКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ИЗНОС ЗАТОПЛЕННОЙ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ СТРУЁЙ

Аннотация

Цель работы — разработка установки для испытаний материалов на гидроабразивный износ, моделирующей условия воздействия гидроабразивного потока на поверхность форсунок струйных насосов, используемых на землесосных снарядах. Проведён анализ ГА-воздействия на поверхность форсунок, на основе которого предложена схема установки для проведения опытов на износ затопленной гидроабразивной струёй. Произведена настройка установки, а также проведены первые испытания, которые показали удовлетворительную повторяемость получаемых результатов.

Ключевые слова: струйный насос, форсунка, гидроабразивное изнашивание, абразивные частицы, угол атаки.

Введение

Гидроабразивное (ГА) изнашивание — основная причина ремонта оборудования судов технического флота — земснарядов, используемых для рыхления пород под водой и транспортировки пульпы в отвалы, в рамках производимых дноуглубительных работ и работ по добыче строительных материалов [1, 2]. ГА-износ снижает энергоэффективность используемого оборудования: грунтовых насосов, пульпопроводов, струйных насосов, дноуглубительных головок и т. п. (рисунок 1).



Рисунок 1 - Износ крышки (а) и рабочего колеса (б) грунтового насоса земснаряда

Процесс ГА-изнашивания оборудования является неотъемлемой частью технологического процесса дноуглубительных работ, а поэтому изменение конструкции или режима работы оборудования оказывает отрицательное влияние на его производительность. По этой причине самым распространённым способом поддержания работоспособности изнашиваемого оборудования земснарядов

является должный выбор материалов для изготовления ответственных деталей оборудования. И в развитии этого направления кроется огромный резерв.

Осмотр оборудования гидротрегрузателей ГП-14 и ГП-18 [3] показал, что условия ГА-воздействия даже на поверхность одной и той же детали могут существенно отличаться в зависимости от рассматриваемого района изнашиваемой поверхности. Такой типичной деталью являются, к примеру, форсунки струйных насосов, используемых на вышеуказанных земснарядах. ГА-износ форсунок вызывает изменение направления струи форсунок, что ведет к снижению производительности струйного насоса и быстрому износу его корпуса (рисунок 2).

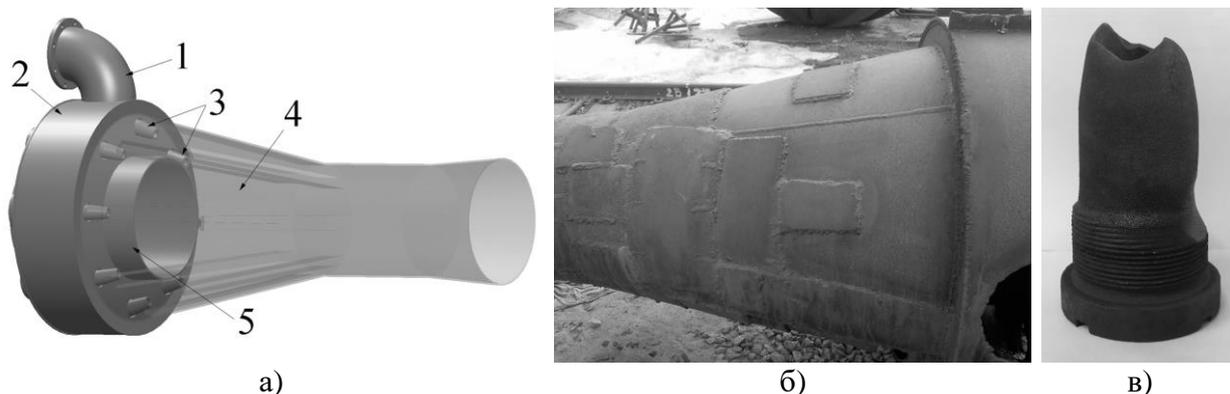


Рисунок 2 - Схема устройства (а), отремонтированный корпус с заплатками (б) и изношенная форсунка(в) струйного насоса земснаряда ГП-14: 1 — трубопровод для подачи воды под рабочим давлением; 2 — круговая камера, 3 — форсунки; 4 — камера всасывания, 5 — пульпопровод

Сложность выбора материала для изготовления изнашиваемых деталей заключается в том, что процесс ГА-изнашивания зависит от множества факторов: размера абразивных частиц, их концентрации в потоке, скорости потока, угла атаки и т. д., и при различных условиях эксплуатации относительная износостойкость конкретного материала может изменяться существенно: в рядах ГА-износостойкости материалов могут происходить инверсии [4]. Таким образом, определиться с выбором материала можно только в лабораторных условиях при условии выбора режима испытаний, соответствующего условиям ГА-воздействия в условиях эксплуатации оборудования.

Цель работы — разработка установки для испытаний материалов на гидроабразивный износ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Провести анализ ГА-воздействия на примере форсунок струйных насосов гидротрегрузателей;
- 2) Выбрать схему установки;
- 3) Обеспечить повторяемость получаемых результатов испытаний.

Анализ ГА-воздействия на поверхность форсунок

Все изношенные форсунки имеют несимметричную форму вследствие неодинакового износа по окружности носика форсунки (рис. 2 в). Моделирование потока в струйном насосе [5] с использованием программного комплекса Fluent (в составе Ansys Student 2023 R1) показало, что углы атаки ГА-потока на ближнюю 1 к пульпопроводу сторону форсунки и дальнюю 2 от него существенно различаются (рисунок 3). Если угол атаки ГА-потока на ближнюю к пульпопроводу сторону форсунки практически равен нулю, то на дальнюю от пульпопровода сторону форсунки угол атаки находится в диапазоне от 20° до 50°.

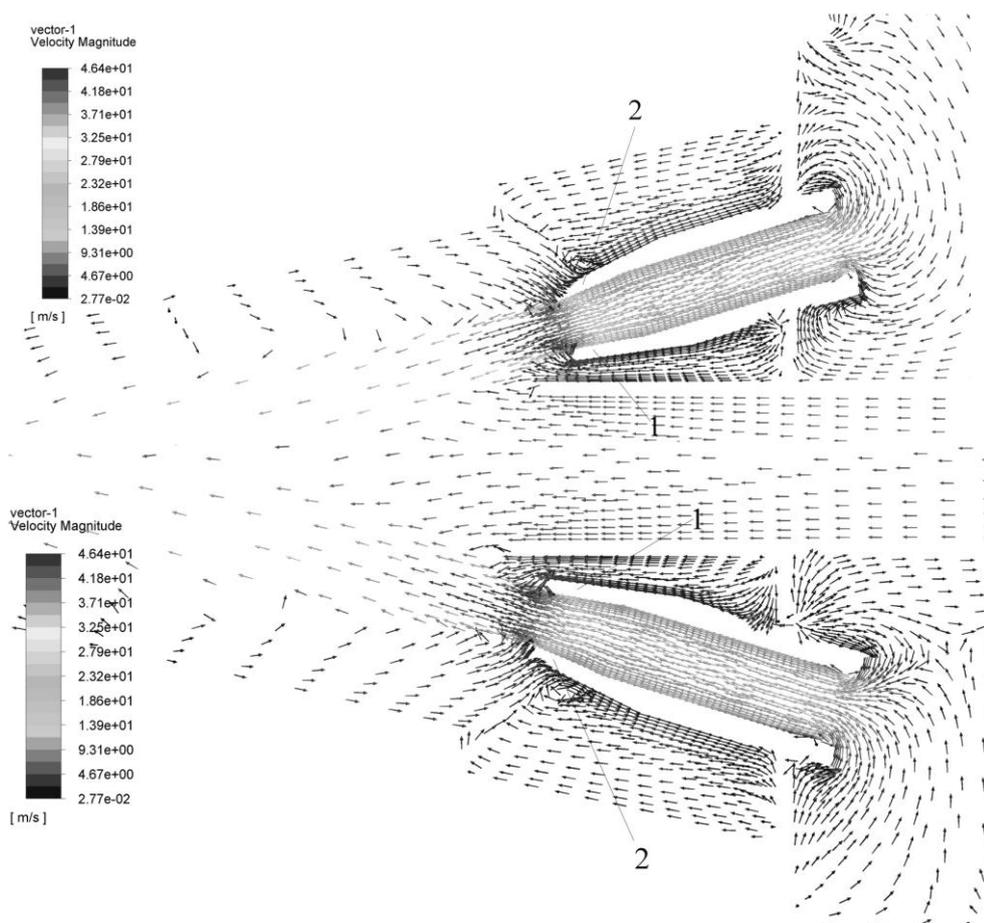


Рисунок 3 - Результаты моделирования течения жидкости в струйном насосе в районе расположения форсунок

Известно, что зависимость износа от угла атаки абразивных частиц при газоабразивном [6] и гидроабразивном [7, 8] изнашивании большинства сплавов, за исключением сравнительно хрупких имеет максимум, соответствующий значению угла атаки в диапазоне от 20° до 50° . Например, для углеродистых сталей, близких по составу к стали форсунок, ГА-износ имеет максимум на углах атаки 30° [7] и 45° [8]. При этом износ для углов атаки близких к 0° и 90° снижается по сравнению с максимумом в несколько раз. Поэтому в результате износа плоскость (рис. 2 в) выходного отверстия форсунки получает наклон по отношению к оси форсунки. Очевидно, что жёсткость схемы напряжённого состояния поверхностных слоёв будет изменяться с изменением угла атаки ГА-потока [9], а поэтому и схема напряжённого состояния поверхности форсунки при ГА-воздействии отличается в зависимости от расположения рассматриваемого участка поверхности по окружности форсунки. Сложность лабораторного моделирования ГА-воздействия на натурные объекты в том, что в лабораторной установке невозможно одновременно воспроизводить несколько режимов ГА-воздействия. Однако этого и не требуется, иначе будет утеряно важнейшее преимущество лабораторных испытаний материалов, заключающееся в возможности исследовать влияние конкретного фактора на ГА-износ при поддержании значений других факторов на постоянном уровне. Требуется только при испытании на лабораторной установке обеспечить ГА-воздействие, соответствующее самой жёсткой схеме напряжённого состояния, реализуемой на поверхности изнашиваемой детали оборудования, в данном случае форсунки струйного насоса. А это значит, что лабораторная установка должна позволять варьирование основных факторов, определяющих

процесс ГА-изнашивания, в широких пределах.

Установка на ГА-изнашивание

В настоящее время известно большое количество типов установок для испытаний на ГА-изнашивание [1, 2, 10–12]. Тем не менее известные установки не позволяют реализовать испытания в условиях воздействия затопленной ГА-струи, т. е. в условиях, которые реализуются, в частности при изнашивании форсунок струйных насосов гидрперегрузателей. В единственной работе, посвящённой испытаниям при воздействии затопленной ГА-струи [13], показано, что характер износа поверхности металла заметно отличается при воздействии ГА-струи на воздухе и в воде, однако подробных исследований, в частности, вопроса, приводит ли переход к испытаниям с затопленной струёй к изменению в рядах относительной ГА-износостойкости материалов, не проводился.

Предложенная в настоящей работе установка работает следующим образом (рисунок 4): абразивные частицы 1 смешиваются с водой, получившаяся смесь всасывается в насос 2, и через выходной патрубок 3, направляется в сопло 4. Далее гидроабразивная смесь попадает на образец 5, который закреплен в державке 6, после чего абразивные частицы попадают в гидроабразивную смесь, находящуюся в баке, и заново захватываются насосом и направляются на образец: так обеспечивается постоянная работа установки. Положение державки относительно оси гидроабразивной струи и расстояние от сопла регулируется винтом 7, который перемещается по отверстиям в планке 8, при этом возможно также изменение углового положения образца по отношению к направлению действия ГА-струи. В патрубок 3 вмонтирована система, состоящая из кранов 9, 11 и патрубков 10, 12, система служит для обеспечения повторяемости результатов испытаний.

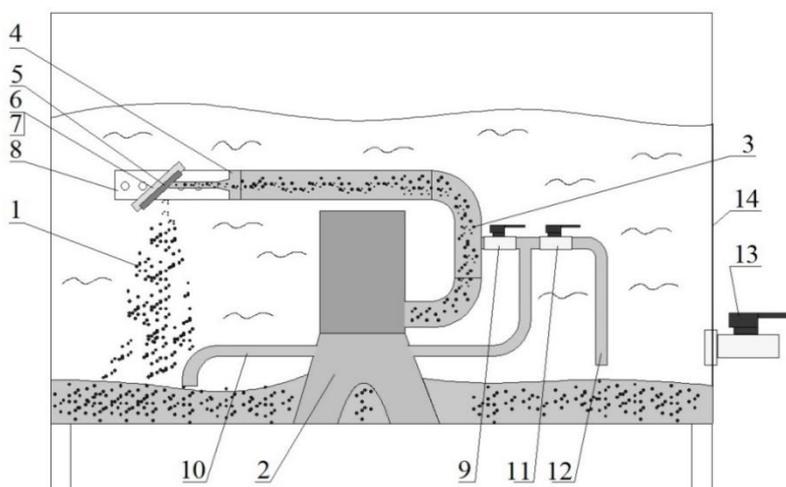


Рисунок 4 - Схема установки на ГА-изнашивание: 1 – абразивные частицы; 2 – дренажный насос; 3 – выходной патрубок; 4 – сопло; 5 – образец; 6 – державка; 7 – регулирующий винт; 8 – планка; 9 – кран; 10 – длинный патрубок для всасывания гидроабразивной смеси; 11 – кран; 12 – короткий патрубок; 13 – сливной кран; 14 – бак

Патрубки 10 и 12 служат для частичного отвода гидроабразивного потока и направления его на дно бака с целью активного перемешивания абразивных частиц в воде, поддержания их во взвешенной состоянии и выравнивания их концентрации по объёму бака. Кран 13 служит для простоты обслуживания установки.

Для настройки режима работы установки в качестве материала образцов выбрана сталь 20; образцы вырезали из отработавших форсунок струйного насоса

земснаряда. В качестве абразивных частиц использовали речной песок, просеянный с целью получения фракций с разным размером частиц. В настройке установки использовалась фракция песка с размером песчинок от 0 до 1,0 мм. Диаметр сопла равен 4 мм. Расстояние от поверхности образца до сопла — 25 мм. Скорость ГА-струи — 36,7 м/с. Концентрация абразивных частиц — 4 % по объёму. Угол атаки принят равным 90°. Краны 9 и 11 (рисунок 4) открыты.

Износ образцов в процессе отладки установки определяли по потерям массы взвешиванием их на аналитических весах с дискретностью показаний 0,1 мг. Износ образцов после 10 мин испытаний, получаемый в параллельных опытах, колеблется в сравнительно узком диапазоне, и оказался равным $33,3 \pm 6,7$ мг. Погрешность указана с доверительной вероятностью 80 %. То есть предложенная схема установки обеспечивает хорошую повторяемость результатов.

Результаты испытаний

После отладки установки проведены испытания при разном угле атаки. На рисунке 5 представлены графики изменения массы образцов при различных углах атаки струи.

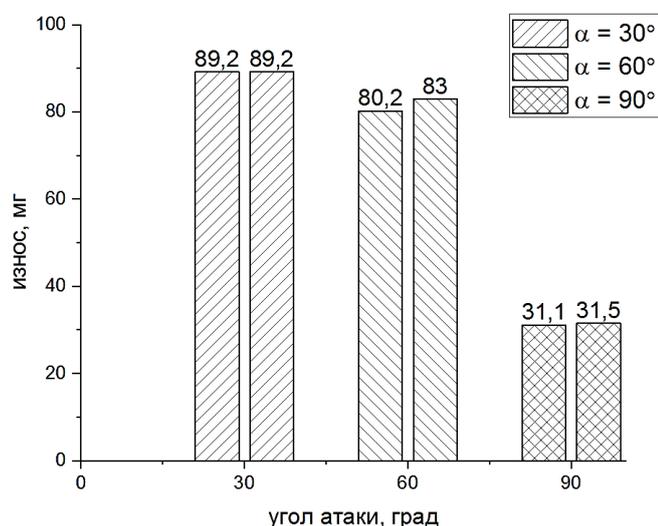


Рисунок 5 - Изменение массы образцов при различных углах атаки ГА-струи на образец

Из столбчатой диаграммы видно, что наименьший износ происходит при угле атаки $\alpha = 90^\circ$, далее, при уменьшении угла атаки, наблюдается рост износа, и при угле $\alpha = 30^\circ$ достигает максимума. Полученный результат согласуется с известными данными о влиянии угла атаки на ГА-износ, изложенными выше.

Внешний вид изношенных образцов (рисунок 6) позволяет выявить четко образовавшуюся лунку и наличие выступающей части по центру, что является следствием низкой концентрации абразива в смеси. Кроме того, можно выделить две зоны — центр лунки, в котором наблюдается выкрашивание зёрен металла, что свидетельствует о режиме микрорезанья, и окраина лунки, где образуются регулярные микроволны (рябь), говорящие о происходящей интенсивной пластической деформации, что обусловлено окатанной формой частиц речного песка [5, 9].

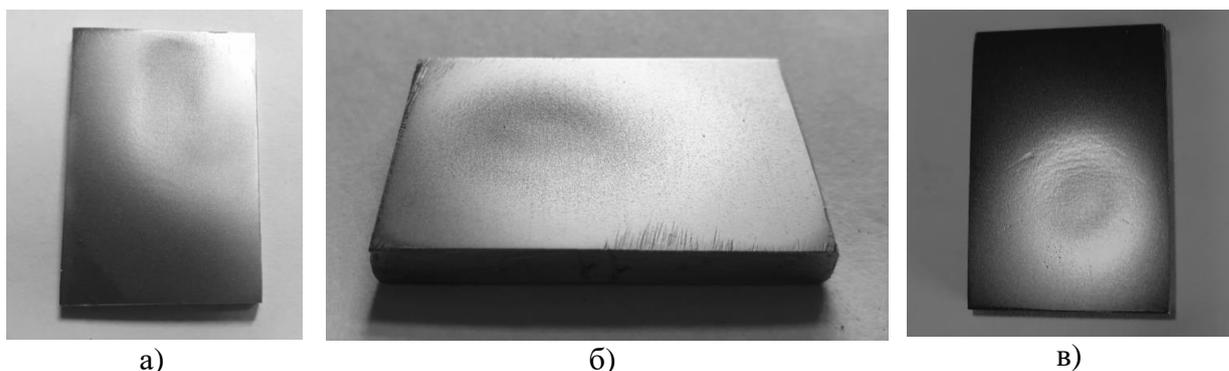


Рисунок 6. Фотографии поверхности образцов из стали форсунок после испытаний при угле атаки гидроабразивной струи, равной 30 (а). 60 (б) и 90 (в) градусов

Как видно из рис. 7, экспериментальную зависимость потерь массы образцов от времени ГА-воздействия можно аппроксимировать прямой линией, которая, однако, не выходит из начала координат. А это значит, что изнашивание при угле атаки ГА-потока под углом 90° происходит с коротким инкубационным периодом, в течение которого идёт накопление пластических деформаций в поверхностном слое. Следует отметить, что короткий инкубационный период регистрировался ранее также и в опытах на ударно-абразивное изнашивание [9]. Наличие инкубационного периода позволит провести исследования кинетики упрочнения металла в течение инкубационного периода и более точно оценить критическую деформацию, соответствующую началу отделения частиц износа, что в свою очередь, позволит более точно подобрать режим испытаний для оценки ГА-износостойкости материалов в условиях изнашивания форсунок струйных насосов. Следует отметить, что ранее инкубационный период при ГА-изнашивании не регистрировался, например, в статье [14] показано, что независимо от угла атаки гидроабразивного потока износ сталей изменяется прямо пропорционально продолжительности воздействия, т. е. изнашивание происходит без инкубационного периода, что указывает на то, что основной механизм потери материала с поверхности — микрорезание. Тем не менее, регистрация инкубационного периода в настоящей статье представляется вполне вероятным, учитывая окатанность частиц речного песка, используемого в опытах, в отличие от частиц искусственных абразивов. Так, например, в статье [15] при воздействии на поверхность алюминия.

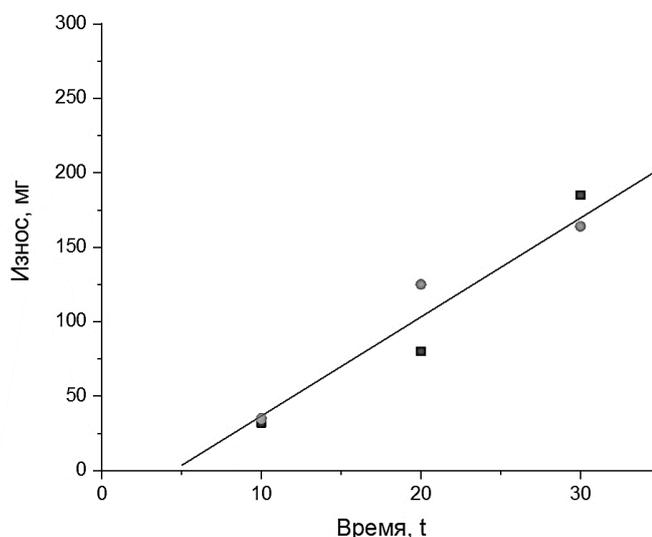


Рисунок 7 - Зависимость износа от продолжительности воздействия ГА-струи на образец при угле атаки, равном 90° .

Закключение

Отработана схема экспериментальной установки для испытаний материалов на ГА-изнашивание, позволяющая получать стабильные результаты в параллельных опытах. Погрешность определения потерь массы испытываемых образцов не превышает 20 % при доверительной вероятности 80 %. Первые опыты показали существование линейной зависимости между износом образцов и продолжительностью испытаний; при этом на кинетической кривой изнашивания регистрируется короткий инкубационный период, в течение которого потери массы практически отсутствуют, а в поверхностных слоях образца идёт накопление пластических деформаций. Изменение угла атаки ГА-струи показало максимальный износ при $\alpha = 30^\circ$.

Благодарности

Авторы выражают благодарность начальнику РЭБ флота в г. Отрадное Ленинградской области А. М. Олейнику за предоставленную возможность провести обследование форсунок струйных насосов на действующих судах технического флота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Погодаев Л. И. Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования / Л. И. Погодаев, П. П. Шевченко. - Л.: «Судостроение», 1984. - 264 с.
2. Козырев, С. П. Гидроабразивный износ металлов при кавитации / С. П. Козырев. - М.: Машиностроение, 1971. - 240 с.
3. Петров В. А. Гидроабразивное изнашивание оборудования судов технического флота/ Петров В. А., Олейник А. М., Ежов Ю. Е., Цветков Ю. Н.// 67-я Международная научная конференция Астраханского государственного технического университета, Астрахань, 29-31 мая 2023 года: материалы / Астраханский государственный технический университет. - Астрахань: Изд-во АГТУ, 2023. - С. 583–587.
4. Тененбаум М. М. Сопротивление гидроабразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. - М.: Машиностроение, 1976. - 271 с.
5. Цветков Ю. Н., Гидроабразивный износ форсунок струйного насоса / Ю. Н. Цветков, В. А. Петров, И. Е. Ивко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. - 2024. - Т. 16. - №1. - С. 97-108. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-1-97-108.
6. Young, J. P. and A.W. Ruff. "Particle erosion measurements on metals". *Journal of Engineering Materials and Technology*. 99 (1977): 121-125. <http://dx.doi.org/10.1115/1.3443420>.
7. Javaheria, V. D. Portera and V.-T. Kuokkalab. "Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials" *Wear* (408-409) (2018): 248-273. doi.org/10.1016/j.wear.2018.05.010.
8. Al-Bukhaiti, M.A., S.M. Ahmed, F.M.F. Badran and K.M. Emara. "Effect of impingement angle on slurry erosion behaviour and mechanisms of 1017 steel and high-chromium white cast iron" *Wear* 262 (2007): 1187-1198. doi :10.1016/j.wear.2006.11.018
9. Цветков, Ю. Н. Напряжённое состояние металлов при изнашивающем воздействии абразива / Ю. Н. Цветков, Л. И. Погодаев. - СПб.: СПбГУВК, 2004. - 94 с.
10. Патент 2107277 РФ, МПК G01N 3/56, Установка для испытания материалов на износ / Тимашев С.А., Улыбин В.С., Зотов Ф.П., Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем машин» Уральского отделения РАН – N 93042514/28, 1998.
11. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов / Комбалов В.С. - М.: «Машиностроение», 2008. - 384 с.
12. Патент 53777 РФ, МПК G01N 3/56 Стенд для испытания материала на гидроабразивное изнашивание / Цветков Ю. Н., Мешалкин С. М., Феофанов И. С., Акимов

И. В., Харламов Е. И., Адагашев Р. И., Центр разработки нефтедобывающего оборудования (ЦРНО) (SC) - N 2005133726/22, 2005.

13. Штерцер, А. А. Воздействие гидроабразивной струи на материал: гидроабразивный износ / А. А. Штерцер, Б. Е. Гринберг // Прикладная механика и техническая физика. - 2013. - Т. 54, № 3(319). - С. 191-201.

14. Yao, J., F. Zhou, Y. Zhao, H. Yina, Q. Guo and N. Li. "Experimental Investigation of Erosion of Stainless Steel by Liquid-solid Flow Jet Impingement". *Procedia Engineering* 102 (2015): 1083 - 1091. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.231.

15. Talin, J. E., Y. A. Ballout and R. O. Scattergood. "Erosion ripple formation mechanism in aluminum and aluminum alloys" *Wear* 1-2(196) 1996: 285-294.

V.A. Petrov¹, U.N.Tsvetkov¹

¹ GUMRF named after Admiral S.O. Makarov,
Saint Petersburg, Russia, 9522114620w@gmail.com

EXPERIMENTAL RIG TO TEST MATERIALS UNDER WEAR WITH SUBMERGED HYDROABRASIVE JET

Annotation

The goal of the article is designing the experimental installation to test the materials under hydroabrasive wear, that takes place on the surface of the nozzles of the dredgers jet pumps. The analysis of the hydroabrasive attack on the jet surface was carried out, and the scheme of the experimental rig was developed to conduct the tests on the wear under submerged hydroabrasive jet attack. The adjustment of the rig was made and the first experiments were carried out. The obtained results showed satisfactory repeatability.

Keywords: Jet pump, jet, hydroabrasive wear, abrasive particles, angle of attack.

УДК 678.067

doi: 10.18720/SPBPU/2/id24-223

Е.А. Шарко, И.В. Блышко, Д.Д. Дворянцев, М.Ю. Соболев, А.С. Саргсян,
И.В. Лишевич, А.В. Анисимов
НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей»,
Санкт-Петербург, Россия, E-mail: mail@crism.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.

Аннотация

Работа посвящена исследованию физико-механических свойств и триботехнических характеристик новых гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов (ПКМ). Исследовано влияние состава гибридных тканей на физико-механические свойства и триботехнические характеристики новых ПКМ. Показано, что новые гибридные антифрикционные материалы не уступают по характеристикам антифрикционным углепластикам и превосходит их по некоторым показателям.

Ключевые слова: ПКМ, гибридные антифрикционные ПКМ, углепластики, коэффициент трения, прочность.