

УДК 62.2+ 67.05+67.02+629.5.03

С. А. Кулаченков,
асп.;

С. Н. Безпальчук,
инж.;

Е. Н. Белецкий,
гл. технолог

ПЕРСПЕКТИВЫ СПОСОБА МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОЛИРОВАНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЫ СУДОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

PROSPECTS THE WAY MAGNETORHEOLOGICAL POLISHING RESPONSIBLE PARTS OF FUEL EQUIPMENT OF SHIP ENGINE

В статье рассмотрен новый подход к механической финишной обработке, представляющий собой магнитно-реологическое полирование свободным абразивом внутренних и внешних поверхностей ответственных деталей топливной аппаратуры судовых дизелей. Представлены различные варианты магнитных жидкостей, проведен сравнительный анализ нескольких вариантов составов, рассмотрено влияние олигомерных матриц на физические и химические свойства рабочих жидкостей. Предложен новый комплексный подход исследований, который включает выбор методик и алгоритмов испытаний, этап подготовки составов магнитно-реологических жидкостей, адаптированных к конкретному случаю механической обработки, этап выбора стендов трения, выбора средств инструментальной оценки, измерительно-вычислительных комплексов и методик обработки данных. Получены новые данные по температуре в зоне работы магнитно-реологических жидкостей, а также наибольшие диаметры пятен контакта образцов, которые позволяют оценивать наиболее эффективные составы жидкостей по производительности процесса механической обработки.

The article describes a new approach to mechanical finishing, representing a magneto - rheological polishing free abrasive inner and outer surfaces of critical parts of fuel equipment of diesel engines for ships. Features various kinds of magnetic fluids. A comparative analysis of several variants of compositions and the effect of oligomeric matrices on the physical and chemical properties of working fluids. We propose a new integrated approach of research, which includes: choice of methods and algorithms of tests, the preparation of the compositions of the magnetic rheological liquids adapted to the specific case of machining, the selection stage stands friction, the choice of instrumental evaluation, measuring and computing complexes and methods of data processing. New data on the temperature in the vicinity of the magnetic rheological fluids and largest diameters of contact spots of the samples, which allows to evaluate the most effective composition of fluids on the performance of the machining process

Ключевые слова: магнитные жидкости, порошки металлов, механическая обработка, испытательные стенды, инструментальный мониторинг.

Key words: magnetic liquids, powders of metals, machining, test stands, tool monitoring.



ФИНИШНЫЕ операции обработки прецизионных поверхностей контактирующих деталей широко используются при изготовлении отдельных узлов топливной аппаратуры судовых дизелей, таких как толкатели в блоках топливного насоса, плунжерные пары, запорные иголки в распылителях. В настоящее время широко применяют операции доводки, хонингования и суперфиниша. Однако они не обладают достаточной производительностью, а также не удовлетворяют возросшим требованиям к точности обработки и низкой шероховатости (по параметру Ra 0,32...0,08 мкм). Поэтому поиск альтернативных технологий финишной обработки является актуальной задачей современного судового двигателестроения.

Для получения качественных функциональных поверхностей с низкой шероховатостью и снижения их себестоимости создаются новые методы обработки [1] – [3]. Так, одним из новых ме-

тодов является магнитореологическое полирование (*МРП*). Данную технологию можно отнести к методам магнитно-абразивной обработки (*МАО*), т. е. обработки, осуществляемой при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле [4]. Сущность *МАО* заключается в том, что рабочая среда, состоящая из ферромагнитных, абразивных частиц и смазочно-охлаждающей технологической жидкости (*СОЖ*) прижимается к обрабатываемой поверхности заготовки с помощью магнитного поля индуктора. В результате этого процесса происходит проникание абразивных зерен в обрабатываемую поверхность. Для интенсификации съема материала с поверхности заготовки производят возвратно поступательное перемещение заготовки относительно магнитного индуктора. Технологические возможности *МАО* соответствуют значениям Ra 0,02...0,06 мкм [4], [5].

Для обеспечения технологичности и высоких требований к обрабатываемой поверхности в качестве рабочей среды были применены магнитно-реологические суспензии (*МРС*), представляющие собой жидкости и пасты с довольно продолжительным периодом нахождения в гомогенном состоянии (до нескольких суток). Также в *МРС* вводят различные добавки: абразивные материалы (искусственные алмазы, оксид церкония и т.д.), поверхностно-активные вещества (*ПАВ*), антиокислители, смачиватели и т. д. Относительно низкая вязкость в отсутствии магнитного поля позволяет равномерно распределить вводимые добавки по объему суспензии. Благодаря «текучести», *МРС* можно более интенсивно подводить к обрабатываемой поверхности, отводить на очистку и возвращать в технологический цикл. Приведенные технологические особенности положительно сказываются на качестве обрабатываемой поверхности. Технология позволяет обрабатывать с прецизионной точностью образующие прилегающих поверхностей запорных иголок, форсунки распылителя, наружные и внутренние диаметры плунжерной пары, седла клапанов и подобные конструкции деталей пар трения.

В настоящее время во всем мире существует большое количество статей и патентов по *МРП* [1] – [6]. Основные публикации сосредоточены на разработке технологической базы для обработки оптических поверхностей (стекол, оптических кристаллов, полимерных линз и т. д.) и кремниевых подложек микросхем. Также публикуются сведения по микропрофилированию (снятию микрозаусенцев) изделий микроэлектроники и изделий сложной формы из различных. Ведутся работы по применению метода *МАП* в медицине для полировки искусственных суставов. Предложено довольно большое количество рецептур *МРС* с различными добавками (абразивные, антиоксиданты, *ПАВ*, смачиватели и т. д.) [5], [6]. Добавки и модификаторы в *МРС* позволяют существенно расширить спектр их применения.

Первые научные исследования, проведенные в 60-е гг. XX в., позволили установить, что неотъемлемой характеристикой магнитных материалов является твердость. Однако более поздние исследования показали, что существующие гомогенные жидкости действительно обладают слабыми магнитными свойствами. К таким жидкостям относятся водные растворы парамагнитных солей некоторых элементов (железа, марганца, гольмия), причем их магнитные параметры настолько малы, что о промышленном применении магнитных свойств этих жидкостей не может быть и речи. Растущий спрос и потребности современной техники привели к появлению новых жидких магнитных материалов, обладающих свойствами текучести жидкостей и способностью взаимодействовать с магнитным полем как твердое тело.

Магнитные жидкости представляют собой устойчивую высокодисперсную систему лиофобного типа с высокой степенью лиофилизации стабилизированных частиц магнитного материала в дисперсной среде и уникальны тем, что высокая текучесть сочетается в них с высокой намагниченностью, в десятки тысяч раз большей, чем у обычных жидкостей. Секрет такой высокой намагниченности заключается в том, что в жидкость введен высокодисперсный магнитомягкий материал, покрытый тонкой (мономолекулярной) оболочкой стабилизатора, препятствующей агрегации (слипанию) магнитных частиц. Поэтому в отличие от обычных суспензий, частицы в магнитных жидкостях не седиментируются, в результате чего могут сохранять свои рабочие характеристики в течение многих лет. Если увеличить концентрацию и размер частиц магнитного

материала, то механизм стабилизации такой жидкости изменится от адсорбционно-сольватного и электростатического до структурно-механического и гидродинамического, т. е. стабилизация таких систем будет происходить из-за высокой концентрации магнитных частиц и высокой вязкости всей дисперсной системы. Такие концентрированные «магнитные жидкости» получили название *магнитно-реологические жидкости (МРЖ)*.

Свойства МРЖ определяются совокупностью входящих в них компонентов (твердой магнитной фазы, дисперсионной среды и стабилизатора), варьируя которые можно изменять их физико-химические параметры в зависимости от условий применения. Одним из отличительных свойств магнитных жидкостей является изменение комплексной вязкости МРЖ в зависимости от величины приложенного магнитного поля (рис. 1), а также достаточная абразивная способность самих частиц, которые выполняют роль свободного абразива, позволяющего снимать слой материала заготовки и задавать шероховатость согласно требованиям чертежа [6], [7].

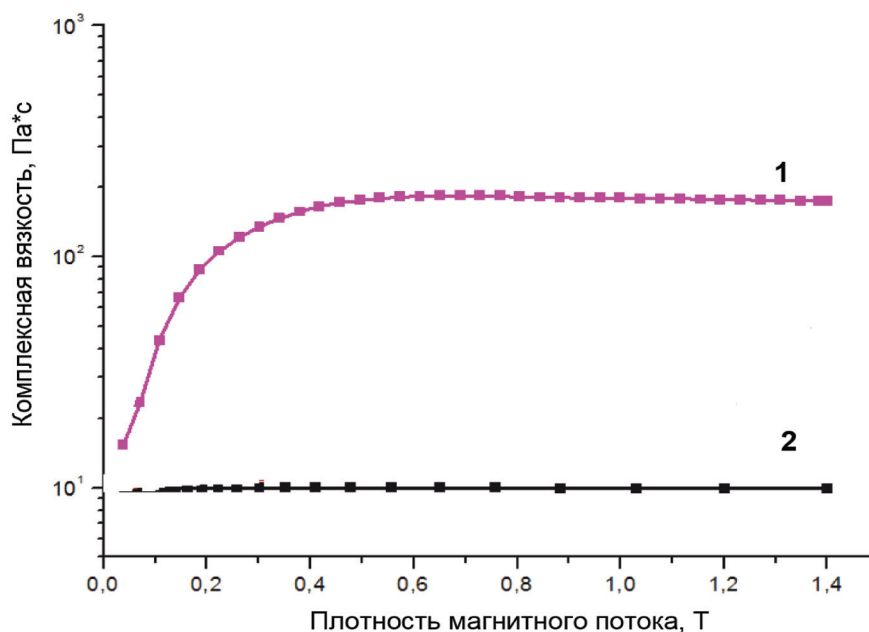


Рис. 1. Зависимость комплексной вязкости от плотности магнитного потока:
1 – магнитная жидкость; 2 – жидкая основа

В результате испытаний МРЖ необходимо было решить следующие задачи.

1. Определить состав МРЖ и их триботехнические характеристики применительно к задачам машиностроения и процессам финишной механообработки свободным абразивом.
2. Выбрать методики и алгоритмы испытаний.
3. Выбрать стенд для испытаний (стенды и машины трения по своим характеристикам, близкие к процессам разрушения с использованием схемы, предложенной проф. И. В. Крагельским (рис. 2) [8]).
4. Выбрать приборы и методы инструментальной оценки поверхностей трения образцов и технологических сред (МРЖ).

Эксплуатационные характеристики МРЖ определяются входящими в их состав компонентами. Так, жидкую основу подбирают из расчета химической стойкости, температуры эксплуатации, наличия специфических свойств и т. д. Для создания МРЖ, использующихся в уплотнениях валов мешалок аппаратов, работающих под вакуумом, необходимым свойством жидкой основы является низкое давление паров при рабочей температуре. В узлах трения, где МРЖ используется в виде смазки, необходимы антифрикционные характеристики. В технологических системах в качестве рабочей среды используются максимальные фрикционные характеристики и абразивные свойства, достаточные для осуществления процесса резания и удаления слоя обрабатываемого материала.

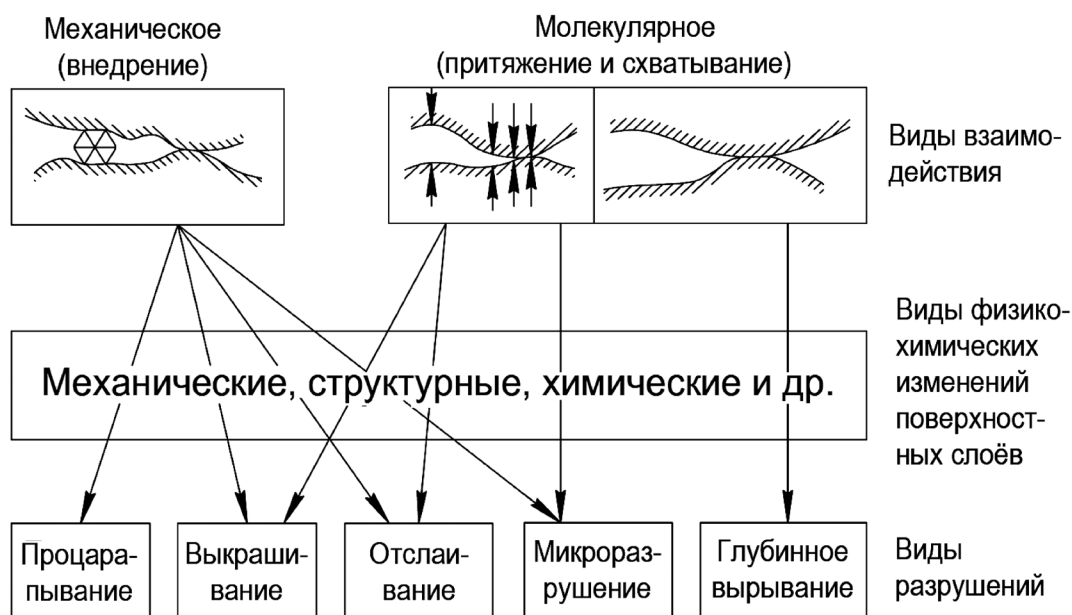


Рис. 2. Классификация видов разрушения поверхностных слоев по И. В. Крагельскому

Выбор магнитного материала определяется необходимыми магнитными характеристиками, дисперсностью, химической стойкостью, а также, в некотором роде, его совместимостью с жидкой основой [9]. Стабилизатор, служащий для предотвращения агрегации магнитного материала и совмещения его с жидкой основой подбирается из расчета, чтобы одна часть его молекулы была совместима с жидкой основой, а другая образовывала связь с поверхностью частицы магнитного материала. Одним из наиболее распространенных стабилизаторов являются *ПАВ*, в частности, органические жирные кислоты и их соли, при этом взаимодействие с поверхностью частицы магнитного материала носит ионный характер. Однако при таком взаимодействии молекулы *ПАВ* постоянно сорбируются и десорбируются с поверхности, что приводит к появлению на ней вакантных мест, которые могут быть заняты присутствующими в жидкой основе примесями. В конечном итоге, такие взаимодействия приводят к изменению рабочих характеристик магнитной жидкости.

Исходя из особых физико-химических свойств магнитно-реологических жидкостей, был предложен способ стабилизации магнитных частиц, заключающийся в образовании ковалентной связи между поверхностными атомами магнитной частицы и молекулой стабилизатора. В качестве магнитного материала было выбрано железо карбонильное радиотехническое марки Р-10, ГОСТ 13610-79, что, в первую очередь, связано с его великолепными магнитными свойствами и достаточной абразивной способностью по отношению к обрабатываемому материалу.

На основе этой технологии были получены *МРЖ* на базе ВМ-4 – масло вакуумное ТУ 38.401-58-3-90, УПИ – смазка (перфторированный углеводород) ТУ 95-2289. Данные по специально подготовленным составам *МРЖ* с различным процентным содержанием в них магнитного материала и результаты испытаний приведены далее.

Состав: основа + железо карбонильное Р-10:

№ 1: массовое содержание железа 80 %, основа ВМ-4;

№ 2: массовое содержание железа 59 %, основа ВМ-4;

№ 3: массовое содержание железа 84 %, основа ВМ-4;

№ 4: массовое содержание железа 56 %, основа УПИ.

Состав: ВМ-4 + железо карбонильное Р-10, модифицированное перфторированным прекурсором.

№ 3 (Fe-S60Cl): массовое содержание железа: 83 %, основа ВМ-4.

В качестве основы были использованы:

ВМ-4 – масло вакуумное ТУ 38.401-58-3-90 (изм. 1-6);

УПИ – смазка (перфторированный углеводород) ТУ 95-2289.

Магнитный наполнитель – железо карбонильное радиотехническое марки Р-10, ГОСТ 13610-79.

Проведение натурных испытаний на реальных объектах новых разработанных технологических сред (ТС) является обычно трудоемким и дорогостоящим. Поэтому для определения рационального состава активных препаратов в этой среде или параметров качества поверхностного слоя материала заготовки на практике широко используют различные стенды и машины трения.

Для определения фрикционных свойств ТС без процесса резания чаще всего используют стандартные машины трения с точечным скользящим контактом образцов, позволяющих развивать более высокие удельные нагрузки, характерные для процесса резания, чем при линейном контакте ЧШМ-4 или ЧМТ-1. Максимальное давление в зоне контакта для этих машин может находиться в пределе 1500 ... 5000 МПа. В настоящее время широкое распространение получили четырехшариковые машины трения. Узел трения этих машин представляет собой пирамиду из четырех контактирующих друг с другом шариков диаметром 12,7 мм, изготовленных по первому классу из закаленной стали ШХ15. Верхний шарик, закрепленный во вращающемся шпинделе, прижимается с заданной нагрузкой к трем неподвижным нижним шарикам. Частота вращения шпинделя постоянна и, как правило, находится в пределах (1460 ± 70) об/мин. Длительность краткосрочных испытаний $(10 \pm 0,2)$ с. На четырехшариковой машине трения по стандартной методике определяют противоизносные, противозадирные и антифрикционные свойства жидких и пластичных смазочных материалов и технологических сред, находят критическую нагрузку P_k , нагрузку сваривания P_c , индекс задира I_z , а также показатель износа $D_{и}$.

Согласно принятой методике, критическая нагрузка P_k характеризует способность смазочных материалов предотвращать быстрое изнашивание трущихся поверхностей. Нагрузка сваривания P_c характеризует предельную работоспособность смазочного материала. Это наименьшая осевая нагрузка, вызывающая останов машины при достижении момента трения 1200 Н·м или сваривании шариков. Индекс задира I_z – безразмерная величина, которая определяется по величине износа шариков при различных нагрузках: от начальной до нагрузки сваривания. Показатель износа $D_{и}$, мм, определяется как средняя величина диаметра пятен износа нижних шариков при испытаниях в течение одного часа с постоянной нагрузкой, меньшей критической.

В качестве измерительных и аппаратных средств при проведении исследований МРЖ был использован измерительный комплекс на базе оптического микроскопа МБС-10 с теленасадкой и бесконтактный прибор оценки температуры по инфракрасному спектру модели INFRARED RTI-520, а также искусственная термopара. Визуальный мониторинг поверхности образцов шариков осуществлялся с помощью измерительно-вычислительного комплекса на базе оптического микроскопа МБС-10 (рис. 3) с телевизионной приставкой – цифровая USB видеокамера Altami USB 3150R6 1/2CMOS. МБС-10 используют в различных областях естественных наук: археологии, биологии, зоологии, приборостроении, машиностроении и др. МБС-10 работает как в проходящем, так и в отражённом свете, на нём можно рассматривать как тонкие образцы, так и объёмные предметы, т.е. микроскоп МБС-10 является стереоскопическим. Для работы с микроскопом можно использовать как естественное освещение, так и встроенный осветитель. Изменение межзрачкового расстояния у стереомикроскопа МБС-10 составляет от 56 до 72 мм, округленные значения увеличений – 7-, 4-, 2-, 1- и 0,6-крат, объектив с фокусным расстоянием $f = 90$ мм, осветитель (лампа РН8-20-1), рабочее расстояние не менее 95 мм.

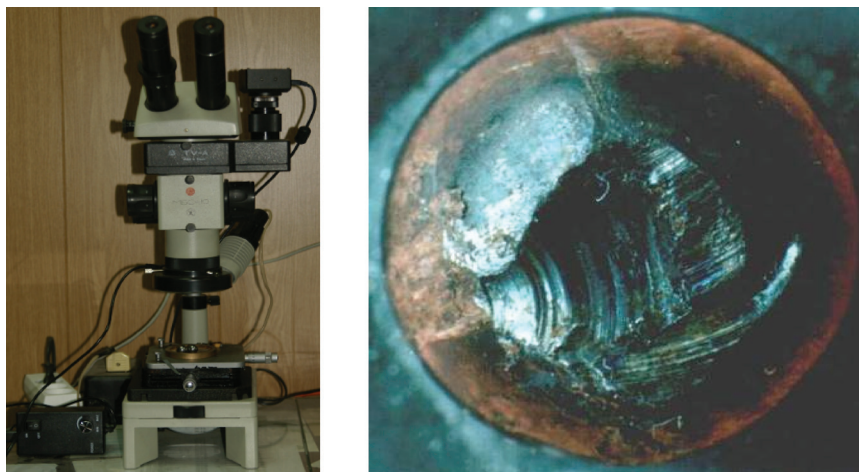


Рис. 3. Измерительно-вычислительный комплекс на базе оптического микроскопа МБС-10 с фотоадаптером TV-A и телевизионной приставкой

Используемая цифровая USB видеокамера Altami USB 3150R6 1/2CMOS на основе трёхмегапиксельной CMOS-матрицы с большим пикселем ($3,2 \times 3,2$ мкм) адаптирована к техническим измерениям. При максимальном разрешении 2048×1536 пикселей передача информации происходит со скоростью 6–10 кадров в секунду. Также доступны разрешения 1024×768 и 512×384 пикселей с много большей скоростью передачи изображения. Данные режимы можно использовать для точной фокусировки на объекте исследования, а затем, переключившись на максимальное разрешение, настраивать параметры изображения (баланс белого, экспозицию, яркость, насыщенность и др.). Цифровая USB видеокамера 3 MPix имеет оптимальные технические характеристики, необходимые для проведения качественной фотосъёмки на микроскопах даже исследовательского класса. Входящее в комплект программное обеспечение «Altami Studio» позволяет выводить на экран изображение исследуемого объекта в режиме реального времени, управлять всеми настройками камеры, процессом съёмки и проводить различные измерения как на статичном, так и на «живом» изображении.

Испытания проводились при максимальной нагрузке 5000 МПа в течение 60 мин. Результаты испытаний разных составов МРЖ приведены на рис. 4. Обработка данных экспериментов осуществлялась методом малой выборки по методикам, используемым в инженерных расчетах.

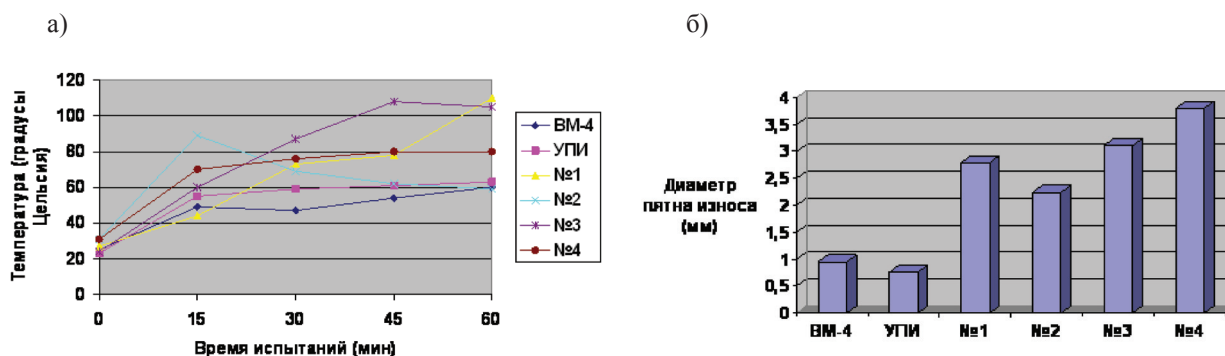


Рис. 4. Зависимость от состава МРЖ:
а – температуры в зоне контакта; б – диаметра пятна износа

На основе проведенных собственных испытаний, а также данных, изложенных в работе [10], можно сделать следующие выводы об абразивных способностях МРЖ:

– с увеличением концентрации магнитных частиц пропорционально увеличивается пятно контакта (характерно для основы ВМ-4);

– синтетическая основа УПИ даже при сравнительно небольших концентрациях магнитного порошка до 60 % приводит к существенному абразивному износу пятна контакта, по сравнению с образцами на ВМ-4;

– при малых концентрациях магнитных частиц в ВМ-4 отмечены резкие скачки температуры, что связано со схватыванием контактирующих поверхностей;

– состав № 4 (основа УПИ) способствует плавному росту температуры на протяжении всего испытания.

Следует отметить, что на процесс трения, микрорезания и микрошлифования при использовании *МРЖ* оказывает влияние большое количество факторов, что, в свою очередь, требует дополнительных инструментальных исследований на стендах, смонтированных непосредственно на металлорежущем оборудовании с применением специально спроектированной технологической оснастки.

Список литературы

1. *Гаршин А. П.* Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин [и др.]. — М.: Научтехиздат, 2003. — 384 с.
2. *Левин М. Л.* К вопросу о теплообмене в процессе магнитореологического полирования / М. Л. Левин, Л. К. Глеб // 5th Minsk International Heat and Mass Transfer Forum, 2004. URL: http://www.imamod.ru/~serge/arc/conf/MIF_2004/S06/6-20.pdf (Дата обращения 9.11.2012).
3. Пат. 088002 ВОИС. System for magnetorheological finishing of substrates / W. Kordonski [и др.]. Оpubл. 28.06.2012.
4. *Яковлев О. Б.* Магнитореологическая доводка оптических деталей / О. Б. Яковлев, М. А. Ломакова, В. А. Дерябин // Прикладная оптика-2010: материалы IX Междунар. конф. — СПб., 2010. — Т. 2. — С. 154.
5. *Помогайло А. Д.* Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. — М.: Химия, 2000. — 672 с.
6. *Rodin V. M.* Modification of Iron Nanoclusters by Perfluorinated Radicals / V. M. Rodin [et al] // Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures. — 2008. — Т. 16. — № 5–6. — С. 706–710.
7. *Singh Anant Kumar.* Nanofinishing of atypical 3D ferromagnetic work piece using ball end magnetorheological finishing process / Anant Kumar Singh, Sunil Jha n, Pulak M. Pandey // International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2012. — № 63. — С. 21–31.
8. *Петров В. М.* Применение модификаторов в узлах машин для решения триботехнических задач / А. М. Петров. — СПб.: СПбГПУ, 2004. — 282 с.
9. *Jang K. I.* Deburring microparts using a magnetorheological fluid / K. I. Jang [et al] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2012. — Vol. 53. — № 1. — P. 170–175.
10. *Кулаченков С. А.* Перспективы применения в судостроении магнитных жидкостей с особыми реологическими свойствами / С. А. Кулаченков, В. Ю. Елоховский, В. М. Петров // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте: тр. V Международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо-2013», 10—11 октября 2013 г. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2013. — С. 222–228.
11. *Безпальчук С. Н.* Обобщенная модель состояния качества поверхности ответственных деталей судовых энергетических установок, выполненных из композиционных углепластиков / С. Н. Безпальчук, А. А. Буцанец, В. М. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 1 (29). — С. 97–102.