

Миклуш В.П.,¹
Тарасенко В.Е.¹
Дунаев А.В.²

¹УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: Miklush@tut.by

²ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия,
E-mail: gosniti@list.ru

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ ТРИБОСОСТАВОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ БЕЗРАЗБОРНОГО РЕМОНТА

УДК 629.3.014.2

В статье приведен обзор основных этапов применения минеральных трибосоставов при проведении безразборного ремонта и результаты анализа дифрактограмм серпентинов.

Ключевые слова: трение, масло, трибосостав, серпентин, дифрактограмма, механизм, безразборный ремонт.

Актуальность проблемы

К настоящему времени смазочные материалы достигли высокого качества, пределы их совершенствования практически исчерпаны [1, 2]. Однако они все же не устраняют изнашивания сопряжений, поэтому поиск дополнительных материалов к маслам продолжается.

Практика использования природных веществ, таких как речной ил и полезные ископаемые имеет многотысячелетнюю историю. А широкое применение необычных притирочных составов к маслам начато впервые в 1942 г. в США для устранения дефектов коробок передач большой партии армейских вездеходов фирмы Джeneral Моторс. Успешное применение трибосоставов инициировало, особенно с 70-х гг., их развитие в различных направлениях. Однако масштабных и эффективных трибосоставов для «избирательного переноса» к парам трения «сталь-сталь» в маслах со щелочными присадками, требующего сочетания до десятка сложных факторов не создано [3]. Вместе с тем для реализации как-бы «избирательного переноса», была создана гамма металлоплакирующих добавок к смазкам: масляных суспензий порошков мягких металлов, их сплавов; масляных растворов солей жирных кислот этих металлов, осуществляющих электрохимическое осаждение пленок на стальных поверхностях [4, 5].

Наибольшим развитием «избирательного переноса» с 90-х гг. были именно металлоплакирующие составы. Но им присущи совсем другие триботехнические процессы, идущие не по механизму трибополимеризации смазки, активируемой медью в кислой среде, а по адгезии, диффузии и электролитическому осаждению мягких металлов в среде масел [4].

Более широко разработки разнообразных трибосоставов шли за рубежом, результатом которых к настоящему времени являются более десятка эффективных серийных трибосоставов стран ЕС и США, а всего в историческом плане их рекламировалось около 100 наименований. Так из выявленных 160 патентов РФ по применению трибосоставов выявлено: серпентиновых – 53, металлоплакирующих – 36, фторсодержащих – 9, наноалмазных – 7, многокомпонентных – 6, с графитом – 3, с дисульфидом молибдена – 2, средств и приемов щелочной, магнитной, электрической и другой обработки масел – 10, специфика приемов комплексной обработки деталей и трибосопряжений – 13, масел с добавками – 9.

Десятки патентов США, ЕС защищают специфические составы масел, а также трибосоставы на основе химических реагентов, наноалмазов, металлоплакирующих и полимерных веществ.

Основное содержание трибосоставов: минеральное, металлосодержащее, органическое и трибохимическое, но наиболее востребованы серпентиновые, как смеси гидросиликатов магния, никеля, алюминия, железа, хотя имеются и углеродные кластеры «КАРАТ-М», «ГРАФ» и др.

Следует отметить, что по результатам анализа, проведенного в НАТИ конструкций ДВС зарубежных фирм выявлено, что корпуса маслофильтров всех американских ДВС изготавливались только из магниевых сплавов.

Фирма «Континенталь» (США) – производитель маслофильтров для ДВС в 50-х гг. устанавливала в их корпуса кольцевую прокладку из сплава с высоким содержанием магния, обладающего высокими щелочными свойствами. Прокладка, омываемая потоком фильтруемого масла, интенсивно нейтрализует образующиеся в масле кислоты, уменьшает опасность коррозии, полимеризации и накопления в масле смолистых продуктов.

Канадская фирма «Магма Пауэр» аналогично выпускала резьбовые пробки в масляный поддон ДВС, выполненные из магниевых сплавов с тем же назначением.

В 1970 г. сотрудники УПИ получили на ВДНХ СССР золотую медаль, т.к. введя в маслофильтр ДВС ВАЗ-2101 магниевую фольгу (80x20x0,5 мм), добились ресурса невысокого качества тех времен масел до 50 тыс. км и практически исключили изнашивание ДВС.

Таким образом, не случайно, что наиболее приемлемые трибосоставы включают магний.

Исследования по применению минералов в качестве трибосоставов и практические работы в этом направлении начаты в 1976-1978 гг. на базе Ленинградского института ЛИАП, где в 1982-1984 г. был открыт «эффект низкого трения гидратов по стали» [6, 7].

Проведенные в 1987-1990 гг. исследования в институте «Механобр» [6] способствовали расширению использования серпентиновых трибосоставов.

Горняками давно было замечено повышение износостойкости колесных пар шахтных вагонеток, нагартованных рудной пылью и мелочью серпентинита, а практическую возможность повышения износостойкости и частичного восстановления изношенной стальной поверхности в результате воздействия на нее минерального контртела ученые оценили позже, при бурении скважин на Кольском полуострове. При проходке пластов серпентинита упрочнялись и восстанавливались подшипники бурового инструмента – шарошек, происходило упрочнение и самого бурового инструмента.

Об исследованиях трибологии серпентинов впервые было доложено в 1985 г. на 1-й Международной конференции по трению, изнашиванию и смазке в Ташкенте.

В 1988 г. на Ленинградском Кировском заводе была организована «Академия технического творчества», выпускники которой, наряду с НИИФ «Энион-Балтика», создали несколько творческих коллективов, которые и заложили базу использования геомодификаторов трения (ГМТ) на основе серпентина. С 1990 г. к 2000 гг. этими коллективами создана серия серпентиновых трибосоставов НИОД (НИИФ «Энион-Балтика»), А.Р.Т. (ТК НЕОСФЕРА), РВС (НПО «Руспромремонт»), «Реагент 2000», «Живой металл», «РЮ-11», «Форсан», «Трибо», «Motor doctor», СУПРА и др. [9]. Созданные ГМТ испытаны в Республике Беларусь, Болгарии, Молдавии, Украине, Узбекистане, Египте, Греции, Франции, Италии, Испании, Австрии, Швейцарии, Бельгии, Чехии, Сан-Марино,

Португалії, Бразилії, Аргентині, Сирії, Чилі, Новій Зеландії. Ці трибосостави заклали базу використання нетрадиційної триботехніки природними мінералами. Пізніше на основі серпентинів створені інші прості та комплексні состави: ВІККО, ЕДІАЛ, АРВК, Стрибойл, Моторвіта і др.

НПО «Руспромремонт» з початку 2000-х гг. поставляло в Японію состав РВС і після успішно проведених досліджень і випробувань в Токійському Інституті ім. Васеда в 2002 г. був розроблений РВС на місному сирові [8]. Нескільки пізніше місними спеціалістами в содружестві з російськими створено кілька подібних составів під брендами «RVS Technology», «MRS Technology» (MRS – Metal Recrystallization Catalyst). З 2005 г. в Японії випускались трибосостави: «METARIZER EX» (Metal surface treatment); «Metallion Power chip P250»; «Metarizer professional service». В нинішнє час там випускається состав «Fe-Do». Використання місних трибосоставів з підтримкою ведучих автомобільних концернів Японії проводиться на їх 26 сервісних центрах, а ведучим підприємством в Токіо по ремонту ДВС і поставці японських ДВС по всьому Індокитаю на кінчній стадії обкатки використовують состав «Fe-Do», що дозволяє випускати ДВС з більш високими характеристиками [8].

Аналогічні состави були створені в Китаї, во В'єтнамі (TFT), в Німеччині (REVITEC), в Фінляндії (RVS-ТесОУ), в Швеції (RESTAL).

Основная часть

Особенности серпентиновых трибосоставов в отличие от присадок к маслам показаны в таблицах 1, 2.

Первые серпентиновые составы были созданы на основе породы серпентинита, а впоследствии из минералов группы серпентина выбрали наиболее трибоэффективные кристаллические формы серпентина: антигорит, хризотил и лизардит-1Т.

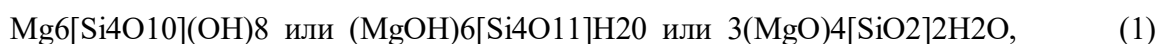
Серпентины представляют собой минералы из подкласса слоистых силикатов по формуле $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$. По морфологии и характеру деформации кристаллической решетки выделены три основные разновидности серпентина: микрочешуйчатая листовая – антигорит (35-50 % в составе ГМТ); тонковолокнистая – хризотил (30-50 % в ГМТ) и тонкозернистая – лизардит структурной формулы Лизардит-1Т (10-30 %).

Например, в ГМТ-порошках, которые использованы для разработанного совместно с ООО «РеалИнПроект» трибосостава МС-2, использованы смеси следующих продуктов:

1. «НА 2011.06». Состав: Хризотил, Антигорит, Лизардит из рудника у г. Нижний Уфалей Челябинской обл.;
2. «ЛЕН 2011.06». Состав: Клино-Хризотил, Антигорит, Лизардит из рудника «Золотая Гора» у г. Карабаш Челябинской обл., а также ПАВ 0,1%;
3. «ЛЕН № 1 10 мкм». Состав: Клино-Хризотил, Антигорит, Лизардит из того же рудника, а также ПАВ 0,2%;
4. «ЛЕН № 2 Индустр». Состав: Клино-Хризотил, Антигорит, Лизардит из того же рудника, а также ПАВ 0,3%.

Серпентины относятся к группе триоктаэдрических слоистых гидросиликатов с кремнекислородными тетраэдрами SiO_4 . Их цвет: беловатый, зеленоватый, желтоватый, темно-буро-зеленый в зависимости от разнообразия содержания атомов Fe^{3+} , Fe^{2+} , а также примесей Ni. Твердость по минералогической шкале 2,5-3, плотность 2550 кг/м^3 , они – породообразующие минералы горной породы серпентинита.

К основным серпентинам относится большая группа минералов близкого химического состава, но описываемых по-разному:



где кремний может частично замещаться алюминием, а магний – алюминием, марганцем, никелем, железом.

Присадки к маслам и серпентиновые трибосоставы, химмотологические признаки

Наименование показателей	Характеристики показателей	
	Присадок	Трибосоставов
Обеспечение рабочих свойств смазочных масел	антизадирных, антиизносных, антифрикционных, моюще-диспергирующих, антикоррозионных	антизадирных, антиизносных, антифрикционных
Обеспечение конституционных свойств смазочных масел	вязкостных, антиокислительных, деэмульгирующих, низкотемпературных	Не обеспечивают. Собственные показатели: - дисперсность, - фракционный состав, - материальный состав
Объект воздействия	базовое масло - углеводородная жидкость	сопряжения трения при поступлении к ним со смазочным маслом
Используемая концентрация	до 20 %	0,01 – 3 %
Взаимодействие со смазочным маслом	растворяются в маслах и смазках, расходуются на поддержание их рабочих и конституционных свойств	Образуют масляные суспензии, расходуются на модифицирование поверхностей трения, а при избытке удаляются со сменой масла
Механизм работы в трибосопряжениях	адсорбция, хемосорбция	адсорбция, хемосорбция, электроосаждение, каталитическое действие на трибосреду и трибополимеризация
Толщина слоя, образуемого на поверхностях деталей	до 40 Å	до 650 мкм у наноалмазных; серпентиновыми составами в разных узлах 20, 100, 600 и до 1000 мкм
Температурный предел действия	до 150 °С у ПАВ, 150 – 350 °С у хемосорбционных	от 150 до 500 °С и в пределах температурной стойкости конструкционных материалов.
Длительность действия	до смены масла	до 3-5 сроков смены масла или 30-50 и 100 тыс. км. пробега автомобилей, год-два работы агрегатов МТП
Обеспечение работы без масла	запрещается	гарантируется безаварийный пробег без масла до 200 км. Показательны пробеги Москва-Питер-Москва (900 км) согласно Диплома рекордов России, Годичная работа тепловозов, электровозов без масла в тяговых редукторах и др. без масла в моторах

Сравнительная триботехническая характеристика присадок к маслам
 и серпентиновых трибосоставов (данные НПО «Руспромремонт»)

Показатели сравнения	Трибосоставы, компенсирующие износ	Присадки к маслам
Упрочнение исходных поверхностей	Существенное, в 1,2 – 1,5 раза	Незначительное и не для всех присадок
Выравнивание микрорельефа поверхностей трения	Заметное, до 0,06 мкм	Небольшое
Наращивание восстановительного слоя и оптимизация зазоров в сопряжениях	Происходит, 10-20 мкм; при больших износах требуется неоднократная обработка	Не происходит
Увеличение ресурса пар трения в сравнении с ресурсом стандартных деталей	Для новых деталей до 2,5 раз, после ремонта до 150 %	Происходит, но менее эффективно
Снижение вибраций и шума агрегатов	Существенное, максимум - на 6 дВ	Незначительное у многих; хорошее у некоторых
Коррозионная стойкость	Высокая, снижение коррозионного износа	Нормативная; для спецприсадок высокая
Теплостойкость восстановленной поверхности	Высокая, до 500 °С	-
Коэффициент трения, механические потери в агрегате	Снижается до 0,025, а механические потери на 20%	Снижаются, но в меньшей мере
Снижение температуры узла трения и смазочного масла	Существенное; агрегат может работать длительное время без смазки	Заметное, но без смазки, работа не допускается
Защита агрегата от аварии при потере смазки	Полная	Небольшая
Снижение «пусковых износов» у ДВС при работе с всесезонными маслами	Значительное	Для присадок, образующих износостойкую защитную пленку
Совместимость со смазочными маслами и рабочими жидкостями	С маслами, гидрожидкостями, дизтопливом, керосином, бензином, спиртом, СОЖ	Индивидуальная для разных пакетов присадок к различным типам масел
Повышение срока службы масла	Заметное, требования к качеству масла снижаются.	Нужно соблюдать сорт и срок службы масла
Периодичность применения	На срок до 2500 час	По исчерпанию ресурса масла
Избирательность действия	В основном для стальных и чугунных деталей	Сбалансированные пакеты присадок универсальны
Технико-экономический эффект	Показатели агрегатов, зависящие от узлов трения, обеспечивают рентабельность 500-1200 %	Повышение ресурса и отдельных показателей

Модель конструкции серпентинов по данным [9] приведена на рисунках 1, 2.



Рис. 1. Структурная модель слоев химэлементов, образующих серпентины

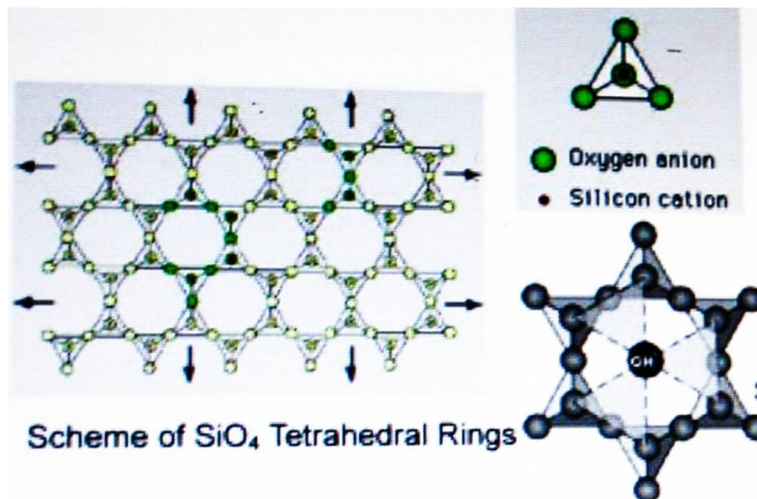
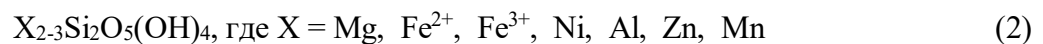
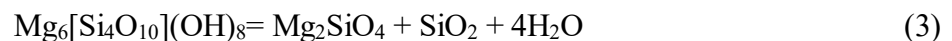


Рис. 2 - Компонировка силикатных (SiO₄) тетраэдров серпентина (Лизардит)

В серпентинит входит до 28 разновидностей серпентина и множество сопутствующих минералов на основе алюминия, никеля, железа, кальция и других химэлементов. Поэтому имеется и такая трактовка состава ГМТ [10]:



и известны 4 типа реакций при разложении серпентинов с выделением силиката магния, кварца, окиси магния, воды, кислорода. Основная реакция:



Переменность состава ГМТ проявляется на их дифрактограммах, в т.ч. исследованных ниже. Примерный компонентный состав ГМТ из высокодисперсных (5-40 мкм) порошков: MgO – 40-45 %, SiO₂ – 40-44 %, H₂O - 12.1-12.9 %. Конституционная вода выделяется при температуре 150-300 °C с разрушением кристаллов.

Состав классических минералов группы серпентина приведен в таблице 3.

Отличаясь структурой, минералы триботехнически работают не одинаково. Для триботехники важен гидросиликат магния - серпентин в форме Лизардита структурной формулы 1Т. Конечно, только одним этим минералом создать ГМТ затруднительно.

Пример минералов группы серпентина

Основные минералы группы серпентина	Формула химсостава	подтверждение дифрактограммами
Клинохризотил	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$	да
Антигорит	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$	нет
Лизардит	$Mg_6(Si_2O_5)_2(OH)_8$	да
Амезит	$Mg_2Al(AlSiO_5)(OH)_4$	нет
Гриналит	$Fe_3(Si_2O_5)(OH)_4$	нет
Непуит	$Ni_3(Si_2O_5)(OH)_4$	да
Серпентин обобщенно двойной формулой	$Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8$	да

На дифрактометре XRD 6000 проведен рентгенофазовый анализ 15 порошков ГМТ от ООО «Венчур-Н», ООО «НЕОСФЕРА», ООО «РеалИнПроект», ГНУ ВИЭСХ и др. Один из результатов анализа приведен на рисунке 3 [2].

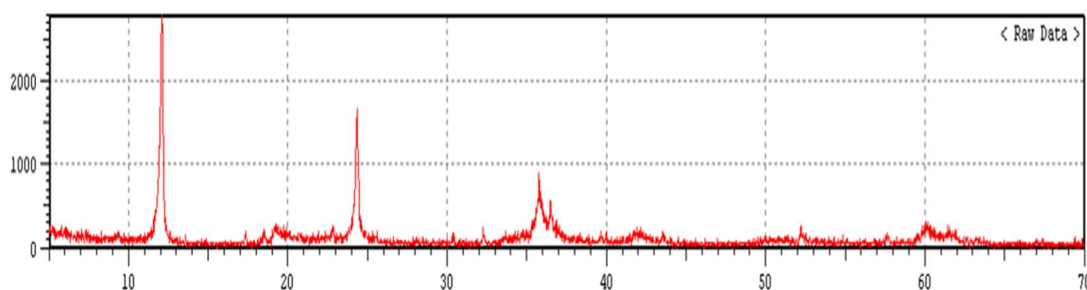


Рис. 3 – Дифрактограмма состава 1 от ГНУ ВИЭСХ (идентифицирован Lizardite-1T)

На всех дифрактограммах [2] между характерными импульсами сигналов основных веществ наблюдался, как помеха, небольшой фон излучения, что свидетельствует о наличии в ГМТ примесей. Названия основных выявленных в порошках веществ по международно-двойной библиотеке спектров ICDD следующие:

- $(Mg,Al)_3(Si,Fe)_2O_5$ Aluminum Iron Magnesium Silicate (Lizardite-1T);
- $(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$ Magnesium Iron Silicate Hydroxide (Lizardite-1M);
- $(Ni,Mg)_3Si_2O_5(OH)_4$ Nickel Silicate Hydroxide (Nepouite-20);
- $(Fe,Al,Mg,Mn)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$ Iron Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide (Orthochamosite-10Ib);
- $(Fe,Mg,Al)_{2,5}(Si,Al)_2O_5(OH)_4$ Iron Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide (Odinite-1M);
- Magnesium Aluminum Silicate Hydroxide (Chlorite-serpentine (NR)).

На основании анализа дифрактограмм порошков сделаны следующие выводы [2]:

1. Порошки практически соответствуют классическим составам гидросиликатов магния, никеля, алюминия с примесями, хотя по библиотеке спектров ICDD они включают также тальк, Orthochamosite-10Ib, Odinite-1M, Chlorite-serpentine (NR).

2. Библиотека спектров ICDD выявила антигорит, являющийся по данным производителей ГМТ одним из основных его компонентов, лишь в составах ООО «Жилсервис» и ВИЭСХ.

3. Треть порошков являются смесями до 10 соединений. Особенно сложны составы от ТК «НЕОСФЕРА» и от ООО «РеалИнПроект». Исключением является состав «РВД» (ООО «Триггер»), состоящий, в основном, из минерала «Лизардит-1Т».

4. Серпентин лизардитовой-1Т конфигурации представлен только в 6-ти порошках из 15: порошки ТК «НЕОСФЕРА», состав РВД, серия составов ООО «РИП».

5. Для некоторых ГМТ в разное время исследований выявлено некоторое различие дифрактограмм и фазового состава, т.к. высокодисперсные порошки ГМТ при хранении претерпевают фазовые изменения.

6. Среди химических элементов в порошках доминирует Mg, Si, а по убывающей концентрации заметны Ni, Fe, Al, Ca и следы Ge, Na, Mn, Sr, Zn, Cu, S, U.

7. Библиотека спектров ICDD в различных попытках идентификации минералов выдает на один и тот же порошок различающиеся наборы до 20 веществ, что затрудняет идентификацию ГМТ.

Выводы

1. Дифрактограммы ГМТ от ведущих производителей подтверждают, что в основном они являются гидросиликатами магния, никеля и алюминия, в некоторых из них имеются примеси железа, марганца и других химэлементов.

2. В целом лабораторные и производственные данные пионеров ГМТ-технологии и легли в основу принципиально нового направления в триботехнике, как безразборного ремонта минеральными трибосоствами. Эта не традиционная триботехника подлежит широкому применению для машинно-тракторного парка сельского хозяйства.

Литература

1. Дунаев, А.В. Технологические рекомендации по повышению ресурса агрегатов тракторов ремонтно-восстановительными добавками к смазочным маслам / А.В. Дунаев, В.П. Лялякин, Р.Ю. Соловьев. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех». – 2013. – 96 с.
2. Дунаев, А.В. Модернизация изношенной техники с применением трибопрепаратов / А.В. Дунаев, С.Н. Шарифуллин. – Казань: Издание Казанского университета. – 2013. – 272 с.
3. Чичинадзе, А.В. Трение износ, смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общей редакцией А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
4. Погодаев, Л.И. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин / Л.И. Погодаев, В.Н. Кузьмин. – С.-Пб.: Изд-во АТРФ, 2006. – 607 с.
5. Синельников, А.Ф. Автомобильные масла. Краткий справочник / А.Ф. Синельников, В.И. Балабанов. – М.: «За рулем», 2003. – 176 с.
6. Зуев, В.В. Конституция, свойства минералов и строение земли (энергетические аспекты) / В.В. Зуев. – С.-Пб: Наука, 2005. – 400 с.
7. Телух, Д.М. Введение в проблему использования природных слоистых гидросиликатов в трибосопряжениях / Д.М. Телух, В.П. Кузьмин, В.В. Усачев. Интернет-журнал «Трение, износ, смазка», 2009. – № 3. – С. 13-17.
8. Пустовой, И.Ф. 14-летний опыт Питерской РВС-технологии. – М.: Труды ГОСНИТИ, 2011. – Т. 107, ч.2. – С. 38-40.
9. Yuansheng, J. and Shenghua, L. Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ / Superlubricity. Edited by Ali Erdemir Argonne National Laboratory. – Argonne, USA; and Jean-Michel Martin, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France // Elsevier B.V., 2007. –P. 445-469.
10. Любимов Д.Н. Применение эффекта поля для снижения фрикционных потерь машин / Д.Н. Любимов, К.Н. Долгополов, Н.К. Вершинин, А.В. Дунаев. Тракторы и сельхозмашины, 2014. – № 10. – С. 40–43.

Summary

Miklush V.P., Tarasenko V.E., Dunaev A.V. The rationale for the use of mineral triboactive to conduct CIP repair

The article presents an overview of the main stages of application mineral triboactive in conducting CIP repair and the results of the analysis of diffraction patterns of the serpentine.

Keywords: friction, oil, tribolistas, serpentine, diffraction pattern, mechanism, and repair.

References

1. Dunaev, A.V. Tekhnologicheskie rekomendacii po povysheniy uresurs agregatov traktorov remontno-vosstanovitel'nymi dobavkami k smazochnym maslam / A.V. Dunaev, V.P. Lyalyakin, R.Yu. Solov'ev. – M.: FGBNU «Rosinformagrotekh». – 2013. – 96 s.
2. Dunaev, A.V. Modernizaciya iznoshennoj tekhniki s primeneniem tribopreparatov / A.V. Dunaev, S.N. Sharifullin. – Kazan': Izdanie Kazanskogo universiteta. – 2013. – 272 s.
3. Chichinadze, A.V. Trenie iznos, smazka (tribologiya I tribotekhnika) / A.V. Chichinadze, Eh.M. Berliner, Eh.D. Braun [i dr.]; pod obshchej redakciej A.V. Chichinadze. – M.: Mashinostroenie, 2003. – 576 s.
4. Pogodaev, L.I. Strukturno-ehnergeticheskie modeli nadezhnosti materialov I detalej mashin / L.I. Pogodaev, V.N. Kuz'min. – S.-Pb.: Izd-vo ATRF, 2006. – 607 s.
5. Sinel'nikov, A.F. Avtomobil'nye masla. Kratkij spravochnik / A.F. Sinel'nikov, V.I. Balabanov. – M.: «Zarulem», 2003. – 176 s.
6. Zuev, V.V. Konstituciya, svojstva mineralov I stroenie zemli (ehnergeticheskie-aspekty) / V.V. Zuev. – S.-Pb: Nauka, 2005. – 400 s.
7. Teluh, D.M. Vvedenie v problemu ispol'zovaniya prirodnyh sloistyh gidrosilikatov v tribosopryazheniyah / D.M. Teluh, V.P. Kuz'min, V.V. Usachev. Internet-zhurnal «Trenie, iznos, smazka», 2009. – № 3. – S. 13-17.
8. Pustovoj, I.F. 14-letnij opyt Piterskoj RVS-tehnologii. – M.: Trudy GOSNITI, 2011. – T. 107, ch.2. – S. 38-40.
9. Yuansheng, J. and Shenghua, L. Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ / Superlubricity. Edited by Ali Erdemir Argonne National Laboratory. – Argonne, USA; and Jean-Michel Martin, Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France/ Elsevier B.V., 2007. – P. 445-469.
10. Lyubimov D.N. Primenenie ehffekta polya dlya snizheniya frikcionnyh poter' mashin / D.N. Lyubimov, K.N. Dolgopolov, N.K. Vershinin, A.V. Dunaev/ Traktory I sel'hozmashiny, 2014. – № 10. – P. 40–43.