

## **Введение в природу использования слоистых гидросиликатов в трибосопряжениях**

В 1982-1984 гг. Д.М. Телухом был открыт «эффект низкого трения гидратов по стали». В 1988 г. акад. В. И. Ревнивцевым на базе Кировского завода была организована «Академия технического творчества», выпускники которой основали НПО «Руспромремонт» и заложили научно-технологическую базу использования геомодификаторов трения (ГМТ) на основе серпентинитов[1]. В результате был разработан препарат «Форсан», предназначенный для повышения работоспособности трибосопряжений. После начального периода (1982-1992 гг.) ознакомления с обширным классом природных минералов, представляющих собой слоистые гидросиликаты, многим захотелось извлечь материальную пользу из открытия. Только в период с 1992 по 1999 г. различным организациям и физическим лицам было выдано свыше 60 патентов по использованию серпентинитов и по ремонтно-восстановительным технологиям (РВС-технологиям), в которых предполагалось использование различных модификаций слоистых гидросиликатов.

Сейчас количество патентов по указанной тематике удвоилось. Кроме организаций «Энион-Балтика» и «Нанопром» (препараты «НИОД» и «Форсан», соответственно), известны другие организации, возникшие в более позднее время и производящие аналогичные антифрикционные и восстанавливающие составы. Известны препараты: ХАДО, «Живой металл», «Трибо», РВС, «Motor doctor», СУПРА, АРВК фирмы «Венчур-Н» и др.

Первоначально серпентинитовые триботехнические технологии применялись только в целях ремонта износившихся механизмов. Это направление особенно актуально в России, где подавляющее большинство эксплуатируемых технических средств превысило свой ресурс в 1,5-2 раза. Позднее метод стал применяться также как профилактическое средство при обкатке новых или прошедших капитальный ремонт машин.

### **Действие ГМТ**

Анализ публикаций и патентов показывает, что при использовании смазочную композицию (СК) с добавлением ГМТ типа серпентинитов работоспособность трибосопряжений может значительно увеличиться. При этом потери энергии на преодоление трения могут снизиться на порядок, а износостойкость сопряженных деталей повыситься в 2-4 раза. Шероховатость металлических поверхностей трения может также снизиться в несколько раз и составить по Ra 0,03...0,05 мкм. При использовании СК с ГМТ на поверхностях трущихся деталей может сформироваться защитный металлокерамический слой толщиной до 20...30 мкм. Скорость формирования (наращивания) слоя пропорциональна локальным всплескам температуры и давлению на пятна фактического контакта. В связи с этим высаживание слоя в первую очередь происходит на изношенных участках сопряженных поверхностей, в результате чего происходит восстановление размеров и формы деталей. На этой особенности поведения ГМТ в трибосопряжениях основана ремонтно-восстанавливающая технология (РВС-технология), позволяющая производить ремонт деталей без разборки машин и механизмов и без вывода их из эксплуатации.

В настоящее время технологические особенности обработки трибосопряжений в каждом конкретном случае устанавливаются, исходя из накопленного опыта, или

экспериментально.

Заранее предсказать, как изменится их работоспособность после обработки препаратами с ГМТ затруднительно. Первоначально в качестве рабочей гипотезы для случая обработки стальных пар геомодификаторами была принята схема, основанная на упрощенном рассмотрении серпентинитов как смеси силикатов магния и включающая в себя элементы моделей образования защитного покрытия, заимствованные из теорий холодной сварки и порошковой металлургии.

### **Схема**

Согласно данной схеме при использовании ГМТ условно выделялось несколько фаз. На начальном этапе происходит очистка и микрошлифование поверхностей пар. Выступы микрорельефа трибосопряжений измельчают частицы ГМТ до размеров, соизмеримых с геометрией рельефа. Под действием контактного давления измельченные частицы вдавливаются во впадины рельефа. Поверхностно-активные вещества способствуют плотному контакту частиц состава с поверхностью металла. При трении в процессе разрушения выступов рельефа происходит выделение тепловой энергии. Благодаря тепловой энергии в присутствии катализаторов, ускоряющих ионно-обменные реакции, происходит замещение атомов магния в серпентине на железо, а атомов железа в приповерхностных слоях стальных деталей - на атомы магния. Заключительной фазой процесса является спекание частиц состава под действием контактного давления и нагревания с образованием сплошного защитного металлокерамического покрытия. Недостаток рассмотренной схемы в том, что она не дает информации о составе покрытия, и о зависимости свойств покрытия от условий обработки, а также от свойств серпентинитов.

### **Серпентиниты и др. ГМТ**

Серпентиниты обычно наследуют некоторые признаки материнских пород. Это выражается, например, в сохранении реликтов первичных минералов. Априорная оценка влияния минерального состава серпентинитов на возможность их использования в триботехнике затрудняется отсутствием надежных сведений о механизмах процессов, происходящих при обработке металлов. Идеальная кристаллохимическая формула серпентина -  $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ . Группа серпентина включает несколько десятков его разновидностей, главными среди которых традиционно считаются хризотил (волокнистый), антигорит и лизардит (пластинчатые). В природных серпентинитах обычно одновременно присутствуют разные модификации. Серпентины относятся к группе триоктаэдрических слоистых силикатов. Кристаллическая структура серпентина составлена двухэтажными слоями, образованными кремнекислородной, тетраэдрической и бруситоподобной октаэдрической сетками, сочлененными через общие вершины. Полиморфные разновидности серпентина обладают устойчивыми отличиями в химическом составе:

В серпентинах Si может замещаться на Al, а Mg на - Al,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ , Ni. Ионы  $Mn^{2+}$  присутствуют в минералах серпентина в высоких концентрациях и оказывают заметное влияние на их механические свойства (такие, как твердость, способность к истиранию и др.), величину относительной диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости, теплопроводности. Эти характеристики важны, поскольку при повышении температуры в узлах трения происходит деформирование поверхностных слоев металла, и, как следствие, возникают электрические и магнитные поля. Высокое удельное электрическое сопротивление серпентинов способствует ослаблению электрохимических и электромагнитных явлений, уменьшению износа деталей; низкая относительная диэлектрическая проницаемость благоприятно влияет на проявление

адгезии к сталям; низкая теплопроводность в десятки раз ниже, чем у известных твердых смазок, способствует высокой термостойкости покрытия, но снижает теплоотвод из зоны трения.

Волокна хризотил-асбеста имеют сопротивление на разрыв почти такое же, как у некоторых сортов стали. Хризотиловый асбест весьма устойчив к нагреванию и только при температурах выше 400°C минерал постепенно становится более хрупким.

Волокнистая структура затрудняет адгезию серпентина к металлам. Присутствие хризотил-асбеста в составе серпентинитов ухудшает свойства трибосоставов.

Пластинчатые серпентины, в особенно антигорит - наиболее стабильная и устойчивая к механическому воздействию и высоким температурам модификация, - более благоприятны для формирования покрытия.

Хлориты, тальк, гидроталькит и другие слоистые железомagneзиальные силикаты, обладающие сходными с пластинчатыми серпентинами химическим составом и структурой, также должны оказывать положительное влияние на свойства триботехнического состава. Все эти минералы имеют структуру, где атомы одной плоскости имеют сильные ковалентные связи, в то время как между параллельными слоями связи слабее, а значит, силы, необходимые для сдвига слоев частиц трибосостава, меньше силы связи с металлом. Высокая спайность обеспечивает плотное соприкосновение частиц с поверхностью металла за счет сил междолинного взаимодействия. Повышенная твердость слоистых силикатов вдоль чешуек способствует сопротивлению изнашиванию.

Крупные реликтовые зерна магнетита и хромшпинелидов, негативно влияют на износ деталей в силу своей высокой твердости и абразивного воздействия.

Серпентиниты как сырье для производства триботехнических составов относятся к группе промышленных нерудных полезных ископаемых, свойства которых при современном уровне развития техники воспроизвести синтетическим путем не представляется возможным. В различных публикациях указываются следующие формулы гидросиликата магнезии:  $Mg_6(OH)_8Si_4O_{10}$  (патенты 2135638, 2184886);  $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$  (патент 2127299);  $3MgO_2SiO_2 \cdot 2H_2O$  (патент 2168663), гидраты со структурой серпентинита, например,  $MgO \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$  (патент 2168663) и т. п. Различают пять минеральных разновидностей серпентинита, которые включают: антигорит, хризотил, клинохризотил, ортокризатил и лизардит. Так как помимо ионов основных металлов в структуру серпентинитов входит вода, то за счет этого на поверхностях трения образуются прочные гидратированные слои, соединенные жидкой прослойкой. А это значительно снижает силу трения за счет реализации на локальных участках сопряжений гидродинамической смазки. Глинистые минералы, в составе которых содержится алюминий, оказывают негативное влияние на свойства трибосоставов. Алюмосиликаты не обладают повышенной адгезией к сталям, как магнезиальные силикаты, и это увеличивает вероятность отслаивания защитного покрытия.

Присутствие брусита и кварца в триботехнических составах влияет положительно на их свойства. Брусит  $Mg(OH)_2$  обладает слоистой структурой, механически легко разрушается, является диэлектриком. Это сравнительно низкотемпературный минерал, который при разложении дает необходимые для процессов ионообмена магнезий и воду.

Высокие пьезоэлектрические свойства кварца способствуют подавлению трибоэлектрического эффекта. Кварц обладает также хорошими изоляционными свойствами. Приведенные примеры отнюдь не исчерпывают весь спектр возможных факторов влияния собственных свойств серпентинитов на характеристики триботехнических составов.

Упомянутые ГМТ, в частности, слоистые гидросиликаты (серпентиниты), относят к ГМТ второго поколения. К первому поколению природных ГМТ относят графит и молибденит. Их слоистая структура снижает потери на трение в сопряжениях за счет сдвиговых деформаций. При разработке критериев оценки серпентинитов как сырья для

триботехники требуется особый подход. Особые требования должны быть и к месторождениям этого вида сырья.

В последнее время большое внимание ученых и различного рода предпринимателей уделяется использованию нерудных полезных ископаемых, представляющих собой древнейшие кварц-образующие и кварц-содержащие породы. Их нужно обязательно перерабатывать по специальным технологиям.

В серпентинитах часто присутствуют реликты оливинов, пироксенов, амфиболов и рудных минералов: хромита, магнетита, сульфидов меди, никеля, кобальта и железа. В структуре серпентинитов присутствуют гетерогенные сростания минералов группы серпентинитов с другими слоистыми силикатами – тальком, хлоритами, каолинитом, смектитами. Кроме серпентинитов в настоящее время в трибосопряжениях в качестве ГМТ используют довольно широкий круг других минералов. Большой разброс исходного сырья по составу предъявляет особые требования к его отбору и последующей переработки. Это необходимо для обеспечения стабильности составов ГМТ, используемых в трибосопряжениях. После переработки сырья продукты контролируют по 18...20 параметрам. При отсутствии необходимого контроля за составом и свойствами препаратов, содержащих ГМТ, влияние СК с ГМТ на работоспособность трибосопряжений может изменяться в очень широких пределах и в ряде случаев приводить к негативным результатам. Опытные данные разных исследователей указывают на значительный разброс результатов при использовании СК с ГМТ. Так разброс по коэффициентам трения в сопоставимых условиях испытаний может изменяться в пределах от 3...4 раз при использовании ГМТ из различных месторождений и до 1,5...2 раз для одного месторождения.

Крупность и количество абразивных частиц в размолотом серпентините оказывают решающее влияние на результаты обработки поверхностей трения природными геомодификаторами. Можно получить резко отличающиеся друг от друга результаты «упрочняющей» обработки поверхностей трения: от чисто абразивной доводки поверхностей без образования защитного керамического слоя до получения защитного слоя максимально возможной толщины 20...30 мкм.

В патенте N 2135638 приведен пример, когда после обработки подшипника качения типа 204 ремонтно-восстанавливающим составом (РВС), содержащим 50...80% (по массе) серпентина (офита); 10...40% нефрита и 1...10% шунгита при крупности частиц 5...10 мкм, был получен защитный слой толщиной от 8 до 14 мкм. Средняя скорость формирования защитного слоя составила примерно 0,5 мкм / ч.

Упрощенный анализ влияния крупности абразивных частиц на шероховатость поверхностей трения и на относительную износостойкость металлических образцов при использовании природных ГМТ типа серпентина позволяет сделать некоторые выводы для практического использования ГМТ. Если металлокерамический защитный слой сформировался на обеих сопряженных поверхностях трения, то повышенная износостойкость деталей может быть достигнута за счет дробления исходных частиц ГМТ в трибосопряжении до средней крупности 2 мкм. При этом скорость изнашивания деталей окажется наименьшей. А при исходной крупности частиц ГМТ, равной 5...6 мкм и их последующее измельчение при работе в трибосопряжении до 2 мкм повысит износостойкость последнего в 2,5...3 раза. В процессе измельчения крупность основной фракции абразивных частиц в СК будет приближаться к 2 мкм, которая соответствует оптимальной шероховатости и наибольшей износостойкости деталей.

При равенстве скоростей образования защитного слоя и его абразивного изнашивания модифицирования поверхностей трения частицами ГМТ не будет. Соотношение между скоростями протекания указанных процессов зависит от содержания ГМТ в СК, а также от количества инородных абразивных частиц в ГМТ. В частности, при исходной крупности частиц ГМТ, равной 4...6 мкм, его содержание в пластичном смазочном материале не должно превышать 3...4 мас. %. При большем содержании ГМТ в СК полезные процессы

формирования защитного металлокерамического слоя будут уступать вредным процессам абразивного изнашивания поверхностей трения. Периодическое добавление свежих порций ГМТ в смазочные материалы после формирования на поверхностях трения защитного слоя нежелательно, поскольку в процессе необходимой после этого очередной приработки трибосопряжения металлокерамический слой будет интенсивно изнашиваться сравнительно крупными абразивными частицами. После формирования на поверхности деталей защитного слоя с целью увеличения его долговечности использованную смазочную композицию целесообразно заменить на смазочный материал, не содержащий природных ГМТ.

Известно, что волокна хризотил-асбеста состоят из совокупности нанотрубок. Такое строение хризотила придает ему повышенную термостойкость и хрупкость. В связи с этим заслуживает внимания патент N 2057257, согласно которому покрытие на поверхностях трения деталей получают из тонкодисперсной смеси минералов дисперсностью 0,01...1 мкм (3,3 мас. %) и связующего (96,7 мас. %) путем приработки препарата в трибосопряжении при давлении не менее 10 МПа и температуре (в микрообъемах) не менее 300 °С. В описании приведен пример использования патента на практике.

Пример. Покрытие из мелкодисперсной смеси (0,01...0,1 мкм) минералов, мас. %: серпентин – 70; энстатит – 20; магнетит – 10. Имеет следующий состав (мас. %): SiO<sub>2</sub> – 35; MgO – 20; FeO – 5; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 15; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 3; сера – 6; примеси – остальное. Состав использован в виде 3% суспензии в нигроле. Покрытие было испытано на локомотивах серии ВЛ-23 в зубчатых передачах тяговых электродвигателей. Осмотр деталей после 3 месяцев эксплуатации выявил улучшение состояния зубчатых передач экспериментальной (первой) тележки. Попытки нанести царапину на покрытие резцом с пластинкой из твердого сплава не увенчались успехом!

Весьма высокая твердость (и, видимо, хрупкость) покрытия явилась закономерным результатом предложенной технологии упрочнения деталей: на поверхностях трения сформировалось покрытие из бетона. В связи с этим утверждения авторов патента о том, что причиной высокой твердости, а также износостойкости являются диффузионные процессы и легирование поверхностного слоя трущихся деталей лишены оснований. Известно, что созревание бетона происходит в результате протекания в цементном растворе реакций гидратации, что и отмечается, где образование покрытия в ряде случаев происходит после выдержки в течение 5...7 суток. В данном разделе приведены результаты анализа влияния добавок — природных геомодификаторов трения типа серпентинита, к смазочным материалам на комплекс механических и физико-химических свойств поверхностей трения и работоспособность трибосопряжений.

К так называемым «металлокерамическим восстановителям» относят диоксид циркония (Y-TZP), голландский Xeramic, Ceramic Engine Protector (для моторного масла) и Ceramic Gear Treatment (для трансмиссионного масла). На отечественный рынок в свое время фирма «Фокар» (С-Пб) поставляла так называемый «Живой металл» (ЖМ) — препарат, содержащий минеральные (гидротермально обработанные серпентинные) катализаторы, органические соединения и керамику. Известна также добавка к маслу РВС (ремонтно-восстановительный состав) и соответствующая РВС-технология. Установлено, что препарат РВС представляет собой классический магнезиально-железистый силикат - серпентин. По мнению фирмы-производителя препарат РВС «обеспечивает локальное наращивание металлокерамического слоя в наиболее изношенных местах двигателей». Корпорация ХАДО (г. Харьков, Украина) и ее московское представительство ООО НПФ «Проблемы трения и износа» широко рекламируют препарат ХАДО как средство для восстановления изношенных деталей машин за счет формирования на поверхностях трения защитных металлокерамических пленок. Аналогичные металлокерамические восстановители выпускают (г. Новосибирск) фирмы ЗАО «Технопарк» (ремонтно-восстановительное средство Motor doctor) и НИИ РТК НПЦ «Трибо» препарат «Трибо». Все перечисленные металлокерамические восстановители активно рекомендуются фирмами-

изготовителями как высокоэффективные добавки к смазочным композициям (СК), кардинально повышающие работоспособность трибосопряжений весьма широкого круга машин и механизмов.

**Было установлено следующее:**

1. Добавление ГМТ в моторные масла в первый период испытаний значительно ухудшает работоспособность трибосопряжений. Резко повышается коэффициент трения  $f_{TP}$  и температура. В дальнейшем триботехнические характеристики улучшаются, уменьшается шероховатость поверхностей трения и увеличивается сопротивление изнашиванию. Изменение этих характеристик в благоприятном направлении у большинства исследователей не превысило 30-100%. Снижение  $f_{TP}$  изменялось в пределах от 6% до 50-100%.

2. ГМТ в СК способствует приработке сопряженных поверхностей. Уменьшение шероховатости поверхностей трения происходит на первом этапе в результате их шаржирования более твердыми частицами ГМТ и последующего абразивного изнашивания на втором этапе.

Была установлена оптимальная концентрация ГМТ в смазочном масле в пределах от 0,05 до 0,4% (по массе), когда имело место равновесие между процессами абразивного воздействия частиц ГМТ и возникновением керамической пленки на поверхности трения. Был также определен оптимальный размер частиц наиболее крупной фракции порошка ГМТ, который не должен быть меньше 5-10 мкм. Более мелкие частицы порошка коагулируются в конгломераты размерами до 100-120 мкм и не проходят через фильтры систем смазки двигателей.

Была установлена еще одна весьма важная особенность поведения частиц ГМТ в трибосопряжениях: для того, чтобы СК с добавкой ГМТ начала работать по установленной схеме (абразивное изнашивание (приработка) - возникновение на поверхностях трения защитных керамических пленок), твердость частиц ГМТ не должна быть ниже поверхностной твердости изнашиваемой детали. Это означает, что взаимодействие частиц ГМТ с поверхностями трения начинается с процессов их шаржирования, т. е. внедрения в них более твердых частиц, входящих в состав ГМТ. В основном это оливины  $(MgFe)_2SiO_4$ , с твердостью по шкале Мооса 6,5 (HRC 67) и пироксены - частицы горной породы, состоящей из сплавов Ca, Na, Mg, Fe, Mn, Ni, Cr, Ti, Al и Si с твердостью 5-6 (HRC 50).

Большинство ГМТ получают на основе природного материала серпентинита, состоящего из серпентина  $Mg_6[Si_4O_{10}](OH)_8$ , магнитного и хромистого железняка, частиц оливинов и пироксенов. Серпентин (твердость по Моосу 2,5-3,5 ? 70-150 кГс/мм<sup>2</sup>) является наиболее мягкой основой серпентинита и по структуре напоминает гетерогенную структуру антифрикционных сплавов. В мягкой волокнистой основе серпентина присутствуют твердые кристаллы в виде кремнекислородных тетраэдров  $SiO_4$ .

Таким образом, шаржирование поверхности трения хотя бы одной из сопряженных деталей более твердыми частицами, входящими в состав ГМТ, является необходимым условием запуска двух процессов: абразивного изнашивания (приработки) и неустойчивого процесса формирования защитной керамической пленки. При отсутствии шаржирования частицы ГМТ (невысокой твердости в случае преобладания в ГМТ серпентина) будут играть в СК роль «загустителя». При этом их защитная роль от изнашивания может проявиться лишь через достаточно длительный период работы трибосопряжения, в конце которого произойдет разложение серпентина на более твердые наночастицы форстерита  $Mg_2SiO_4$ .

Многие исследователи «феномена» ГМТ предприняли попытки раскрыть механизм его взаимодействия с металлическими поверхностями трения. Результаты работ в этом направлении вопреки заявлениям и сложнейшим «научным» моделям, придуманным фирмами-производителями, оказались банальными. Так, сделан вывод о преобладании механического характера взаимодействия ГМТ и керамических добавок к маслам с

поверхностями сопряженных металлических деталей. При этом считается, что происходит механическая обработка поверхностей типа суперфиниширования с реализацией соответствующих положительных эффектов без образования керамических пленок (для пар трения сталь - сплавы цветных металлов). Разложение частиц ГМТ (серпентина) с выделением воды и новых фаз в жестких условиях нагружения приводит к образованию теплоизолирующих керамических пленок (так называемых «зеркал скольжения»).

### Эвристическая модель

Для анализа положительных и отрицательных сторон процесса восстановления керамическими пленками локальных зон износа в трибосопряжениях рассмотрим эвристическую модель образования керамического слоя на поверхности трения при введении в смазочный материал ГМТ в виде порошкообразного серпентинита.

1. Твердые частицы (силикаты, оливины, пироксены и др.), имеющие твердость закаленной стали, шаржируют менее твердые поверхности трения. Это сопровождается ухудшением триботехнических характеристик, повышением температуры и значительным абразивным изнашиванием сопряженной детали, главным образом в период приработки.
2. Более мягкие чешуйки серпентина, тонкодисперсные частицы магнитного и хромистого железняка, а также соединений алюминия, постепенно заполняют пространство между частицами  $\text{SiO}_2$ , оливинов и пироксенов, где сильно уплотняются и теряют свою подвижность в СК.
3. При ужесточении условий трения и неизбежных повышении температуры на поверхности наиболее нагруженных контактных площадок (на несколько сотен градусов Цельсия) происходит разложение серпентина с образованием более твердых фаз и освобождением воды. Новый гетерогенный конгломерат не сразу затвердевает до  $\text{HV} \sim 600$   $\text{кгс/мм}^2$ , а некоторое время находится в псевдожидком состоянии, поглощая в своем объеме новые частицы ГМТ, доставляемые к активированному участку смазочным материалом. В результате происходит наращивание защитного керамического слоя на участке с повышенной интенсивностью изнашивания.
4. Участвуя в реакциях гидратации с образованием кристаллогидратов, освободившаяся вода способствует формированию и затвердеванию новой гетерогенной среды, т. е. образованию металлокерамической пленки
5. В зависимости от условий работы трибосопряжений в различных машинах и механизмах металлокерамический слой может образоваться на большей части поверхности трения или даже покрыть ее полностью. В этом случае вследствие прекращения теплоотвода от детали может произойти повышение температуры в зоне трения.

В качестве примера можно привести надежную работу колесных пар шахтных вагонеток, футерованную толстым керамическим слоем из серпентинита.

Во всех фирмах, кроме РВС, используют для защитной пленки весьма мудреное название – «органометаллокерамическое». По механизму образования защитной керамической пленки

фирмы (из сравнительной таблицы) имеют пять различных моделей. Все модели весьма далеки от истины, а самые нелепые - (ЖМ) и (ХАДО).

Установлены закономерности, характеризующие работоспособность наиболее распространенных на практике сочетаний материалов в трибосопряжениях. Выполнена комплексная оценка влияния на пары трения смазочных композиций, содержащих два десятка широко известных в России и за рубежом присадок. Все это позволяет привести в последней таблице результаты ранжирования СК с различными присадками по степени их влияния на работоспособность трибосопряжений.

Второе место в табл. по износостойкости и трибохарактеристикам занял препарат-реметаллизант «Ресурс». Препарат разработан в НПО «ВМПАВТО» (Санкт-Петербург) и

на его состав получен патент RU N2202600 C2 20 апр. 2003 г. под названием: «Смазочная композиция». Смазочная композиция содержит в мас. %: 1 – порошкообразный металлический наполнитель 3-30; 2 – поверхностно-активное вещество (ПАВ) 1-10; 3 – соли металлов, например: диалкилдитиофосфат молибдена – 2-12; остальное масло (до 100).

#### **Исследования показали следующее:**

- основой большинства препаратов ГМТ являются: лизардит, кальцит, доломит, клинохлор, мусковит, тальк, кварц, шпинель и т.п.;
- в некоторых препаратах имеется состав фаз, который без изменений и без очистки соответственно входит в состав комплексного природного минерала поделочного камня «Змеевик» Малышевского карьера или «Листвинит» Карельского перешейка, только в измельченном виде;
- некоторые порошки ГМТ содержат в своем составе шпинели, а также кварц, то есть оксид алюминия и кремния, являющиеся нежелательными твердыми абразивными материалами в антифрикционном препарате;
- не выявлено материалов, являющихся «ноу-хау» (как записано в патентах), таких как: кластеры углерода (например, фуллерены, нанотрубки); редкоземельные металлы, природные фуллерены и т. п., а также дорогих материалов, получение которых требует применения высоких технологий и энергозатрат;
- главным негативным моментом является то, что даже у одного и того же производителя препарата ГМТ из разных партий, не удалось установить полного соответствия составов, имеющимися на них ТУ, а также, не удалось найти двух одинаковых составов, что говорит о полном отсутствии какого-либо контроля на соответствие препарата заявленным ТУ и средствам выходного контроля.

#### **Визуальный мониторинг показал следующие результаты:**

- основную массу, порошка составляют частицы от 5 до 300 мкм, вместо 2...15 мкм, заявленных в ТУ на данные порошки изготовителями, причем частицы от 100 мкм и выше составляют более 70 %; отмечено слипание частиц.
- возникли дополнительные трудности с точностью определения размеров, поскольку из-за разброса размеров частиц порошков приходилось постоянно изменять увеличение измерительного микроскопа;
- частицы большого размера (до 100 мкм) обладая достаточной твердостью, например, шпинели или кварц, могут не только увеличить износ, особенно прецизионных механизмов, но и резко снизить основные эксплуатационные показатели машин. Например, РВС, могут снизить компрессию в цилиндрах из-за появления продольных рисок не только на компрессионных кольцах, но и на самих гильзах, что является более трудно устранимым тестом при ремонте. Крупные абразивные частицы могут шаржировать поверхности более мягких материалов, например, вкладышей опор скольжения (алюминиевых, медесодержащих или баббитов), а сами вкладыши тогда могут вызвать повышенный износ шеек валов.

#### **Триботехнические исследования:**

- отмечалось некоторое снижение температуры в зоне трения, в среднем на 12...20 %; уменьшение коэффициента трения, в среднем на 8...10,5%; износа - примерно на 25...30 % в условиях экстремального трения, практически без смазочного материала;
- при испытаниях выявлено негативное влияние препарата при передозировках. Установить рациональное содержание препарата в смазочном материале достаточно сложно. Требуются длительные сравнительные испытания для конкретной пары триботехнических материалов и конкретных условий трения;
- в целом результат испытания зависит от большого количества факторов: концентрации



препарата, способа введения в смазочный материал и его перемешивания, температуры в зоне трения, окружающей температуры, продолжительности стоянки между испытаниями и т. п. Это в целом влияет на разброс данных.

Нет стабильности в технологии применения препарата среди его разработчиков.

Результаты измерений у разных препаратов показали различное приработочное действие. В среднем шероховатость изменяется по высотному параметру  $R_a$  примерно в два раза за первые 30...40 минут работы. Определяющим при этом является фракционный состав препарата и фазовый состав частиц. Это условие является определяющим, поскольку от него зависит время нахождения препарата в зоне трения и момент времени, когда возникает необходимость его удаления.

Для большинства производителей ГМТ этот факт оказался новым, поскольку среди них до сих пор преобладает стремление увеличения концентрации и продолжительности работы препарата в СК. Не выявлено явных структурных превращений и значительных изменений микротвердости в поверхностном слое образцов, после испытаний как с препаратом, так и с базовым маслом в течение 15 и 25 ч. Изменение цвета некоторых тонких поверхностных слоев (до 5...10 мкм для стали ШХ15) позволило выявить наличие слоя с повышенной твердостью вследствие наклепа и образования так называемого белого слоя, что имело место и на поверхностях образцов, испытанных с базовым смазочным материалом. Визуальный мониторинг образцов трения и деталей показал: - образование рисок (шириной до 0,05 мм и длиной до 1,5...2 мм) на стальных не термообработанных образцах (стали 20Х13, 40Х, 45) по контртелу из серого чугуна марки СЧ20 в первые 15...45 мин испытаний. Это указывает на присутствие крупных абразивных частиц в зоне трения. Образование локальных прижогов (очагов) после 3 часов испытаний в виде бурых пятен средней площадью до 0,08...1 мм<sup>2</sup>. Структурные превращения в этих зонах требуют дополнительных исследований уровня остаточных напряжений (рентгеновский метод), а также структурных изменений (металлографические исследования). На поверхности отдельных стальных образцов, после 15...25 ч. испытаний наблюдаются отдельные зоны с повреждениями в виде каверн со средней площадью до 1,5 мм<sup>2</sup>. Для хромированных поверхностей компрессионных колец можно отметить появление следующих видов дефектов: продольных рисок вдоль дорожки трения; разрыхления хрома и подложки чугуна у замков; прижогов на хrome на радиальных рабочих поверхностях; прижогов на шатунных пальцах в виде протяженных очагов (шириной до 3...4 мм и длиной до 10 мм). Обнаружено шаржирование твердыми частицами ГМТ поверхности мягких антифрикционных материалов вкладышей подшипников коленвалов двигателя и регулировочных упорных колец, удерживающих коленчатый вал от осевого смещения; образование радиальных рисок и задиров на коренных и шатунных шейках коленчатого вала.

Остановимся на обобщении некоторых результатов, полученных при исследовании шести различных смазочных композиций на базе ГМТ. Композиции были предоставлены различными фирмами и отличались количественным содержанием, фракционностью, типом носителя порошка ГМТ. Рассмотрим только результаты, полученные на бензиновых двигателях, поскольку именно эти испытания выявили наибольшее число проблем, связанных с обработкой узлов трения.

Степень влияния всех композиций на двигатели была разной. Однако характер влияния, полученные результаты и выявленные проблемы имели общий характер. В результате испытаний в пяти случаях из шести наблюдалось улучшение параметров работы двигателей - увеличение номинальной мощности до 3...5%, максимального крутящего момента - до 12%, снижение расхода топлива - от 2 до 8...10% в зависимости от режима работы двигателя и типа ГМТ. Происходило также выравнивание по цилиндрам давления конца сжатия, так называемой компрессии и некоторое ее повышение. Кроме того, благоприятным образом изменялась форма внешней скоростной характеристики

двигателя. В зоне максимального крутящего момента появлялась «площадка», то есть максимальный момент практически не изменялся в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала (от 2800...3000 до 3800...4100 об/мин). В отдельных случаях подтвердилась возможность восстановления параметров изношенного двигателя путем обработки ГМТ. В ряде случаев наблюдалось превышение полученными параметрами базовых значений, заявленных заводом-изготовителем для нового двигателя, например, для Н. Заволжского моторного завода.

Процесс приработки двигателя при СК ГМТ всегда, в той или иной степени, имел общие особенности, несколько уменьшающие плюсы от полученных опытных результатов. В ходе испытаний фиксировалась динамика изменения параметров двигателей в процессе их приработки. Измерение контрольных характеристик осуществлялось через каждые 3...4 моточаса испытаний при общей продолжительности всего цикла 30...50 моточасов.

Продолжительность цикла выбиралась по согласованию с фирмами-производителями присадок, исходя из пробега автомобиля в пределах 2-3 тыс. км. Полученная картина изменения крутящего момента и удельного расхода топлива достаточно характерна и в той или иной степени повторялась для всех видов ГМТ.

Зависимости изменения крутящего момента от продолжительности приработки имели четко выраженный максимум. Положение этого максимума зависело от типа ГМТ и от частоты вращения коленчатого вала. При этом четко прослеживалось связь между оборотами коленчатого вала и положением максимума (оптимальной точки «обработки»).

Быстрее всего максимум кривой наступал при высоких частотах вращения коленчатого вала. Снижение частоты вращения отделяло точку оптимума обработки. Кривые изменения удельного расхода топлива полностью подтвердили вывод о наличии оптимальной точки «обработки» и ее зависимости от частоты вращения коленчатого вала. В этом случае кривые имели ярко выраженный минимум в «оптимальной» точке.

Таким образом, наиболее серьезная проблема, выявленная в процессе исследований, - это изменение теплового состояния двигателя при геомодификации поверхностей трения.

Рост температур пар трения выше некоторого предела, определяемого работоспособностью масла, способствует увеличению механических потерь энергии за счет роста зон сухого и граничного трения. Это является причиной снижения мощности двигателя после прохождения «оптимальной» точки. В частности, этот факт был подтвержден анализом данных эксперимента, при котором двигатель, обработанный ГМТ, испытывался на смазочных маслах с различной вязкостью.

В экспериментах наблюдался рост расхода масла на стадии приработки двигателя при СК с ГМТ. В зависимости от типа ГМТ расход масла на двигателе ВА 3-2108 увеличивался от 0.8 до 1.4 л за 20 моточасов. Причин данного явления несколько. Первая – это повышение температуры поршневых колец в процессе модификации поверхностного слоя. Была промоделирована эта ситуация. Увеличение объемного тепловыделения было взято пропорционально увеличению мощности механических потерь, измеренной в ходе приработки двигателя, по сравнению с мощностью потерь в базовом варианте. Оказалось, что на стадии модификации поверхности деталей температура маслосъемного кольца может увеличиваться в диапазоне от 0 до 100 °С. На номинальных режимах работы эта температура составляет 260...270°С. Следует отметить, что термофиксированные расширители маслосъемных колец имеют температуру отпуска 200...220°С. Поэтому в процессе обработки двигателя ГМТ маслосъемные кольца могут утратить упругие свойства, особенно если процесс приработки ведется на режимах средних и высоких нагрузок. Это предположение подтвердилось после разборки ряда испытанных двигателей и анализа свойств поршневых колец.

Очередная проблема связана с повреждениями в ходе обработки СК с ГМТ рабочей поверхности вкладышей подшипников. Практически всегда после обработки наблюдались продольные царапины на поверхностях вкладышей коренных и шатунных подшипников. Очевидно, это является следствием попадания в зону трения твердых частиц ГМТ,

которые в условиях контакта из-за высокой твердости не модифицируют поверхности, а приводят к сильному абразивному изнашиванию и шаржированию более мягкой поверхности вкладышей.

На основании вышеизложенного можно сделать следующее заключение о целесообразности применения ГМТ в качестве ремонтно-восстанавливающих препаратов ответственных деталей узлов машин и механизмов:

1. Препараты группы ГМТ в настоящее время широко распространены на современном товарном рынке из-за своей доступности, и на первый взгляд, кажущейся простоте применения созданных на их основе СК (1 кг поделочного камня «Змеевик», являющийся исходным сырьем, стоит на рынке С-Петербурга от 25 рублей).
2. Достигается положительный триботехнический эффект на парах чугун-чугун, упрочненная (закаленная, азотированная и т.п.) сталь-чугун. Положительные эффекты, связанные с использованием СК с ГМТ, являются результатом: дошлифовки финишных операций механической обработки поверхностей трения и некоторой модификации, связанной с изменением структуры тонкого поверхностного слоя глубиной 1...5 мкм.
3. Негативными обстоятельствами являются:

- отступление всеми производителями препаратов ГМТ от ими же утвержденных ТУ, как по составу, так и по размерам частиц;
- отсутствие у товарных производителей какого-либо выходного контроля изготавливаемых ими порошков ГМТ. Продажа на рынке жидких составов (порошка в масле) еще более усложняет выходной контроль и технологию применения;
- отсутствие подтвержденного механизма влияния препарата на основные эксплуатационные параметры машин и поверхности трения деталей, выполненных из разных конструкционных материалов, препятствует созданию технологии на основе ГМТ. Такие исследования разработчиками СК с ГМТ не проводились.
- исследования показали, что часто ГМТ создают кислую среду в смазочном материале, что является недопустимым при использовании их в двигателях, а также в механизмах для стальных поверхностей трения. Измененный тепловой режим в зонах трибоконтакта по сравнению с условиями работы штатных трибосопряжений и СК приводит к быстрой окисляемости жидких смазочных материалов (на двигателях почти в 1,5 раза), и как следствие - к уменьшению их работоспособности.

Природные гидросиликаты металлов можно рассматривать как абразивные материалы. В последние два десятилетия в России и в странах СНГ, в основном на Украине, опубликовано большое количество статей, описаний к авторским свидетельствам и патентам, в которых для повышения работоспособности самых разнообразных трибосопряжений рекомендуется использовать смазочные композиции (СК) с твердыми абразивоподобными наполнителями в виде порошкообразных природных минералов, чаще всего в виде слоистых железо-магниевого гидросиликатов - серпентина, хлорита, талька, гидроталькита и т.п. Большинство авторов статей и патентов отдает предпочтение серпентину, т.к. атомы одной плоскости (параллельной поверхности трения) серпентинита имеют сильные ковалентные связи. А между слоями связи уже значительно слабее и, соответственно, отсюда получается низкая сдвиговая прочность. Легкое скольжение слоев силикатов относительно друг друга обеспечивает СК с ГМТ невысокий коэффициент трения (0,02... 0,088) и соответственно меньшие потери мощности на преодоление трения в подвижных узлах машин и механизмов. Такое поведение ГМТ в узлах трения не является открытием, поскольку хорошо изучено на примерах использования аналогичных по структуре наполнителей к СК в виде графита и др.

## **Выводы**

У геомодификаторов (ГМТ) – материалов, конкурирующих с «Наноконтактом», имеются существенные недостатки:

- очень противоречивые и «натянутые» модели объяснения их действия;
- сложность подбора состава ГМТ для конкретного применения;
- сложности измельчения и отсеивания по размеру частиц, входящих в ГМТ;
- ГМТ создают кислую среду в смазочном композите (в масле), уменьшая срок жизни масла;
- ГМТ создают на трущихся стенках хрупкий защитный металлокерамический слой, который резко снижает теплообмен и повышает температуру (в камере сгорания) на 50-150о (тем самым увеличивая выход окислов азота из камеры сгорания – плохо!);
- за счет увеличения температуры сгорания топлива увеличивается КПД двигателя (цикл Карно) на  $KPD = \frac{1100+100-270}{1100+100} - \frac{1100-270}{1100} \approx 2\%$  - это ложный эффект;
- раскаленные каменные «нашлепки» на поверхностях цилиндров или компрессионных колец могут срываться и существенно влиять на момент поджига распыленного топлива;
- осколки «нашлепок» или крупные фракции ГМТ бороздят поверхности (особенно вкладышей).

-----

[1] К серпентинитам относят горные породы, в составе которых на минералы группы серпентина приходится не менее 70-80%. Свободных от примесей мономинеральных серпентиновых пород в природе не встречается.

Количество разнообразных примесей составляет в серпентинитах не менее 5-15%.

Их состав и количество изменяется не только в пределах одного месторождения, но и в пределах очень малых объемов горных пород.