

МИНЕРАЛ

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЙ ЖУРНАЛ



РЕСУРСЫ НЕДР
РОССИЙСКОГО СЕВЕРА:
КАК ИХ ОСВАИВАТЬ?

ПРОБЛЕМЫ ГЕОЭКОЛОГИИ
И ОСВОЕНИЯ НЕДР
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

ВОСПИТАНИЕ ГЕОЛОГИЕЙ –
IV ВСЕРОССИЙСКИЙ СЛЕТ
ЮНЫХ ГЕОЛОГОВ

А. В. Ващёнок, В. В. Казарезов, И. В. Таловина, В. В. Костенко

Серпентиниты в триботехнике

At the beginning of the 90-ths Productive-Innovation Firm «Enion-Baltic», Petersburg developed and took out patent for antiwear working of machine joints by tribotechnique compound НИОД™ (Niod) with serpentinites as base component. The paper considers technical, geological and methodical aspects of development intensification and application to production the new tribotechnique technologies on the base of using non-metalliferous mineral raw materials.

Трибология и триботехника выделились как самостоятельные разделы науки и техники сравнительно недавно. Термин «трибология» (от греч. τρίβος — трение) был введен 9 марта 1966 г. в докладе Британского министерства образования и науки. В нем трибология определялась как наука о фундаментальных и технических аспектах взаимодействия поверхностей при относительном перемещении, а также связанных с ними явлениях и практических приложениях. Разрабатываемые на основе трибологии технические средства и технологии называются триботехническими. Задачей триботехники является «борьба с трением» — уменьшение вызванного им износа и увеличение срока службы машин и механизмов.

Серпентинитами называются горные породы, состоящие преимущественно из минералов группы серпентина. В общепринятых классификациях полезных ископаемых серпентиниты относятся к группе индустриального неметаллического сырья. Это определяется характером их потребления промышленностью — в виде природных агрегатов, подвергающихся лишь механической обработке. Серпентиниты издавна используются в камнерезном деле. Во многих отраслях промышленности широко применяется хризотил-асбест — волокнистая разновидность серпентина, обладающая способностью легко расщепляться на длинные и прочные волокна. Номенклатура изделий, изготавливаемых на основе хризотил-асбеста, превышает 2000 наименований.

Новым потребителем серпентинитов стала триботехника. В начале 90-х гг. научно-производственная инновационная фирма (НПИФ) «Энион-Балтика» разработала и запатентовала способ противоизносной обработки узлов механизмов триботехническими составами НИОД™, базовой составляющей которых являются серпентиниты. По мнению специалистов НПИФ «Энион-Балтика», подтвержденному положительными отзывами многих научно-исследовательских и производственных организаций России и других стран СНГ, использование составов НИОД™ в триботехнике открывает исключительные возможности повышения износостойкости и долговечности механизмов.

Десятилетний опыт внедренческой деятельности НПИФ «Энион-Балтика» обозначил круг разнообразных проблем, объективно тормозящих распространение «серпентинитовых» триботехнических технологий в промышленности. Важнейшая из них заключается в резком отставании теоретических разработок в этой области от практических достижений. Для создания эффективной теории, обеспечивающей успешное решение прикладных задач, необходима постановка научно-исследовательских работ на стыке технических дисциплин с науками геолого-минералогического цикла — геохимией, минералогией, петрографией, учением о месторождениях полезных ископаемых.

В этой статье мы попытались выявить основные технические, геологические и методологические проблемы интенсификации развития и внедрения в промышленность новых триботехнических технологий, основанных на использовании неметаллического минерального сырья. Целью публикации является ознакомление с существом дела широкого круга работников научных и производственных организаций различных специальностей.

Некоторые сведения из триботехники

В основе трибологии и триботехники лежат представления о доминирующей роли топографии поверхностей взаимодействующих твердых тел в явлениях трения и износа. Контактирующие поверхности (пары трения) никогда не являются идеально гладкими, имеют микронеровности. Вследствие контактного давления поверхностей выступы на них подвергаются пластическим деформациям. Сопротивление относительному сдвигу в зонах контакта взаимодействующих поверхностей при их относительном перемещении и является основным источником трения движения. Трение и износ в случае прямого контакта пар трения определяются силами межмолекулярного взаимодействия, твердостью, степенью шероховатости поверхностей, а также свойствами тонких граничных пленок, покрывающих поверхности.

В триботехнике выделяются следующие главные направления борьбы с трением и износом узлов механизмов:

1. Обеспечение возможно лучшего доступа смазочных материалов в трибосочленения для предотвращения «прямого трения» поверхностей деталей механизмов.

2. Оптимизация физико-химических параметров смазочных материалов, в частности, вязкостно-температурных характеристик, величины удельного электрического сопротивления, относительной диэлектрической проницаемости, относительной магнитной восприимчивости, теплопроводности и др.

3. Модификация (преобразование) поверхностей пар трения с целью снижения их шероховатости, которая может достигаться, например, микрошлифованием, выполнением отрицательных элементов микрорельефа и нородным материалом, созданием граничных пленок с заранее заданными свойствами и другими способами.

Первое направление в значительной степени связано с совершенствованием конструкций механизмов. Для повышения качества смазки и модификации поверхностей обыч-

но применяются присадки (добавки в смазочные материалы). Присадки, как правило, специализированы на достижение того или иного эффекта в трибосистемах. Присадки, предназначенные для улучшения ресурсных характеристик смазки, повышают вязкость и температурный порог выгорания и коксования базовых масел. Существуют присадки, активирующие силы сцепления смазок с поверхностью металла; присадки, формирующие на поверхностях пар трения граничные пленки из «мягких» металлов и т. д.

В отечественной промышленности смазочных материалов уже начиная с 60-х гг. широко используются природные минералы. Наряду с относительной дешевизной, они нередко обладают уникальными противоизносными свойствами, воспроизведение которых искусственным путем пока не представляется возможным. Примерами могут служить тальк, графит и молибденит. В трибосистемах с участием этих минералов образуются пленки в видезвесей с особой структурой «чешуйчатой кольчуги». Пленки слаживают неровности поверхностей пар трения и предотвращают прямой контакт металлов. Природные минеральные образования, использующиеся в качестве присадок, называют в триботехнике «геоматериалами» или «геомодификаторами».

Многие присадки, производя узконаправленное воздействие, могут побочко оказывать негативное влияние на другие факторы, управляющие состоянием трибосистем. Более совершенными продуктами триботехники являются смазочные композиции, благодаря которым в трибосистемах реализуется *эффект безызносности*.

Открытие эффекта безызносности, зарегистрированное в 1985 г. (авторы Д. Н. Гаркунов и И. В. Крагельский), тесно связано с явлением избирательного переноса, открытого Д. Н. Гаркуновым еще в 50-х гг. Впервые это явление было обнаружено в системах трения медных сплавов о сталь при использовании в качестве граничной смазки глицерина, исключающего окисление меди. В процессе трения в результате избирательного переноса ионов меди между контактирующими металлами образуется «третье тело» в виде тонкой пленки, состоящей из чистой меди. Медь в этой пленке, названной *серовитиной*, находится в квазижидком состоянии с большим количеством вакансий и дислокаций в приповерхностных слоях. Серовитиновая пленка обуславливает снижение силы трения в системе до значений, характерных для жидкостей, защищает металлы пар трения от изнашивания и обладает способностью к самовосстановлению. Трение не может уничтожить пленку, поскольку само ее создает.

Открытие эффекта безызносности повлекло за собой новую трактовку процессов, происходящих при трении твердых тел, и новый подход к решению задач триботехники. Если раньше трение рассматривалось только как разрушительный процесс, то это открытие обнаружило его созидательные возможности: при определенных условиях, вследствие тех или иных физических или химических явлений, открытые трибосистемы, обменивающиеся с внешней средой энергией и веществом, могут эволюционировать с достижением стационарных неравновесных состояний с высокой степенью организованности.

Практическим следствием открытия стало изобретение смазочных композиций с применением цветных металлов, которые могут вызвать режим возбуждения и саморегулирования процесса — активировать окислительно-восстановительные реакции в начале работы узла трения, обеспечить их затухание в установленном режиме и способствовать выделению необходимых материалов для модификации поверхности.

История изобретения

В конце 70-х гг. в НИИ «Механобр» в Ленинграде были начаты исследования возможности замены цветных металлов в смазочных композициях горными породами.

Первыми опробовались композиции с добавками гидрогетитовых пород железной шляпы одного из вольфрамовых месторождений Приморья. В результате в 1984 г. было защищено открытие «эффекта низкого трения гидратов по стали». Его авторы Т. Л. Маринич, Д. М. Телух и др. установили, что гидрогетиты под действием контактного давления пар трения преобразуют соприкасающиеся поверхности и инициируют процессы саморегуляции трения, снижая силу трения в несколько раз. Проведенные в 1985 г. на Всесоюзном испытательном полигоне НПО «МикроГонмаш» г. Омска испытания гидрогетитовых композиций дали положительные результаты.

В 1985 г. в НИИ «Механобр» была организована исследовательская группа (ВТК) под общим руководством директора НИИ «Механобр» В. Н. Ревнивцева. В состав группы, наряду с геологами В. В. Зуевым и Д. М. Телухом, были включены инженеры из ЛИАП — Т. Л. Маринич и другие. Программа работ группы предусматривала исследования по выявлению новых перспективных видов минерального сырья для производства добавок к консистентным смазкам, а также переход на полупромышленные и промышленные испытания экспериментальных смазок, изготовленных в НИИ «Механобр».

Первые промышленные испытания проводились при бурении гранитовых массивов в пос. Кузнецкое Ленинградской области. В качестве добавок к смазкам использовались железистые кварциты и хлорит-серпентиновые породы. Обработка экспериментальными смесями опор шарошечных долот позволила увеличить срок их службы в 6 раз. Позднее испытания композиций производились при бурении Кольской сверхглубокой скважины.

Одновременно велиась активная пропаганда нового направления в триботехнике среди научно-исследовательских и производственных предприятий различных отраслей народного хозяйства. Начиная с 1986 г. программы работ базировались на соответствующих постановлениях Совета Министров СССР.

Работы над новыми геоматериалами в НИИ «Механобр» были прекращены в 1989 г. после смерти В. Н. Ревнивцева. Преемником НИИ «Механобр» в этой области стала НПИФ «Энион-Балтика».

НПИФ «Энион-Балтика» была организована в середине 80-х гг. на базе ленинградского филиала Федерации инженеров СССР «ЭНИОН» как научно-внедренческое подразделение. В 1991 г. НПИФ «Энион-Балтика» по согласованию с Федерацией была преобразована в самостоятельную структуру с частной формой собственности. С 1993 г. предприятие возглавляет А. Ю. Хренов.

Работы по созданию смазочных композиций с использованием геоматериалов были начаты НПИФ «Энион-Балтика» благодаря привлечению одного из специалистов, ранее занимавшихся этой проблемой в НИИ «Механобр», — Д. М. Телуха. В период с 1991 по 1993 г. было проведено сравнительное изучение триботехнических свойств различных горных пород. Наиболее интересные результаты дали испытания серпентинитов. При обработке различных пар трения «серпентинитовыми» составами коэффициент трения снижался в 4—15 раз, износ — в 2—4 раза. Исследования показали, что применение «серпентинитовых» композиций не только снижает шероховатости поверхностей,

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИДЕИ, МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ

но и приводит к **микровосстановлению** изношенных поверхностей сопрягающихся деталей.

Принципиальная особенность «серпентинитовых» смазочных композиций заключается в следующем. При определенных условиях в результате взаимодействия композиции с поверхностями металлических деталей узла трения на них возникает особое покрытие, характеризующееся значительной долговечностью и обладающее целым комплексом полезных свойств. Природа покрытия не ясна до сих пор. Первоначально предполагалось, что это сервовитная пленка. Это отражено в наименовании патента на изобретение № 2035636 «Способ формирования сервовитной пленки триботехническим составом», зарегистрированном в соответствии с заявкой, поданной в 1993 г. Уже в 1994 г. произошло переосмысление сути изобретения. В патente, зарегистрированном по заявке 1994 г., изобретение именуется как «Способ формирования покрытия на трущихся поверхностях». Соответственно, способ обработки узлов трения с помощью «серпентинитовых» композиций стал рассматриваться как разновидность пассивирования, т. е. создания на поверхностях металлических деталей антикоррозионного покрытия*.

В начале 1994 г. НПИФ «Энион-Балтика» приступила к производству «серпентинитовых» триботехнических составов под торговой маркой НИОД™ (аббревиатура «НИОД» частично отражает формулу изобретения и означает «направленная ионная диффузия»).

Неопределенность в трактовке физического смысла процессов, происходящих при применении составов НИОД™, повлекла за собой в дальнейшем терминологическую путаницу в технической литературе. В различных публикациях способ обработки узлов механизмов с помощью составов НИОД™ именуется как «метод противоизносной обработки составами НИОД», «НИОД-технологии», «обработка материалом НИОД», «метод пассивации узлов трения триботехническими составами НИОД», «обработка пассиваторами типа НИОД» и др.

Следует подробнее остановиться на **коммерческой политике**, использованной НПИФ «Энион-Балтика». Дело в том, что ее применение позволило реализовать идею широкомасштабного промышленного внедрения нового способа противоизносной обработки механизмов в кратчайшие сроки при минимальных опережающих затратах, но, с другой стороны, повлекло за собой и некоторую однобокость его развития.

В основу коммерческой концепции была положена идея продления срока службы сильно изношенного парка техники крупных отечественных предприятий. Применение НИОД™ обеспечивает не только продление срока службы механизмов, но и экономию на смазочных материалах, топливе и электроэнергии, сокращение простоев и затрат на ремонтные работы. Для крупных предприятий топливно-энергетического комплекса, железнодорожного и автомобильного транспорта, речного и морского флота все это приносило вполне ощутимый экономический эффект. Например, на Нерюнгринской ГРЭС фактический экономический эффект только за первый год внедрения технологии составил 152 млн руб. (в ценах 1994 г.); в локомотивном депо Свердловск-Пассажирский суммарный годовой экономический эффект от обработки электроподвижного состава депо составил 2019,5 млн руб. (по ценам на 1.10.1996 г.).

* В 2002 г. НПИФ «Энион-Балтика» получила патент на изобретение «Триботехнический состав».

Финансирование работ НПИФ «Энион-Балтика» осуществлялось на договорной основе на условиях оплаты «по конечному положительному результату». Договорные работы были ориентированы на адаптацию технологии применения НИОД™ к каждому конкретному случаю. Они включали: регулирование свойств составов путем использования тех или иных добавок (ПАВ, катализаторов) в зависимости от особенностей обрабатываемых узлов и используемых смазочных материалов; разработку методик обработки пар трения с учетом конструктивных особенностей механизмов; подготовку рекомендаций и инструкций по применению составов; обучение технического персонала предприятий-потребителей.

Такой подход сопровождался развитием широкой дилерской сети в России и странах ближнего зарубежья. Технологичность применения НИОД™ не требовала высокой квалификации персонала. Поэтому посредники при поддержке НПИФ «Энион-Балтика» нередко создавали мастерские, специализированные на триботехническом обслуживании предприятий-потребителей. В свою очередь это привело к увеличению объема продаж и расширению сферы применения НИОД™.

В итоге удачно подобранная коммерческая политика внешнеэкономической деятельности позволила обеспечить ее развитие на условиях «самофинансирования». Появились средства и на продолжение научно-исследовательских разработок. Субподрядчиками НПИФ «Энион-Балтика» стали НИИ Технологии обработки полезных ископаемых, ВНИИТрансмаш, НИИ «Домен», НПО «Феррит», Балтийский государственный технический университет, Московский химмотологический центр, АО «НИИХИММАШ», ВНИПИ Атомного энергетического машиностроения (ВНИИАМ) и другие организации.

К концу 1995 г. число крупных предприятий-потребителей в России и странах ближнего зарубежья, приобретавших НИОД™, составило уже несколько десятков. Производство и реализация НИОД™ превратились в выгодный бизнес.

Это повлекло за собой возникновение целого ряда малых предприятий, специализированных на внедрение «серпентинитовых» триботехнических технологий. Начиная с 1995 г. на рынке смазочных материалов СНГ стали появляться многочисленные аналоги триботехнического состава НИОД™: «PBC-технологии», «ХАДО-технология», «MOTOR ENERGIZER», «CCPC», «ТРИБО-2», «РЮ-11», «ТСК» и др.* В большинстве случаев организаторами этих предприятий были бывшие сотрудники и дилеры НПИФ «Энион-Балтика». Новые производители триботехнических составов «наследовали» не только технологическую информацию НПИФ «Энион-Балтика», но и ее первоначальную бытовую политику, обусловившую **крайний примитивизм** технологических разработок.

Появление многочисленных конкурентов способствовало продвижению «серпентинитовых» триботехнических составов на рынке смазочных материалов стран СНГ. В 1999 г. предприятия-потребители стали исчисляться сотнями. Наступило относительное насыщение рынка сбыта, обусловившее поиск новых направлений приложения «серпентинитовых» триботехнических технологий и объективные предпосылки для пересмотра и совершенствования их научной базы.

* Попытки воспроизведения составов НИОД™ нередко имели негативные последствия. Например, в 1995 г. по предприятиям Министерства путей сообщения была разослана телеграмма (№ 1444 от 07.06.95), в которой сообщалось о выходе из строя после обработки «неизвестной Главку и НПИФ «Энион-Балтика» фирмой» двух электровозов и рекомендовалось «в случае поступления предложений по этому вопросу проверять компетентность фирмы в НПИФ «Энион-Балтика».

Петротриботехнический метод обработки металлов. Современное состояние и проблемы развития

В настоящее время НПИФ «Энион-Балтика» располагает обширной информационной базой, включающей в себя данные не только стендовых и натурных испытаний, но и многолетних наблюдений обработанных составами НИОД™ механизмов на действующих производствах. Анализ имеющихся материалов приводит к выводу, что начатые в НИИ «Механобр» и продолженные в НПИФ «Энион-Балтика» исследования по применению в триботехнике полиминеральных горных пород привели к созданию *нового метода обработки металлов, основанного на открытии новых свойств серпентинитов как полезных ископаемых.*

Метод обработки металлов трением с применением серпентинитов или аналогичных им по принципу действия и достигаемым результатам индустриальных неметаллических полезных ископаемых мы предлагаем назвать *петротриботехническим*.

Современное состояние петротриботехнического метода определяется тем, что до последнего времени финансирование исследований осуществлялось за счет выполнения договорных работ при решении сугубо конкретных прикладных задач почти исключительно при ремонтных работах. Следствием резкого преобладания утилитарного технологического подхода является практически полное отсутствие теории, объясняющей суть явлений, происходящих при применении НИОД™, и адекватной терминологии. В технической документации на НИОД™ представление о методе дается операционально, путем описания методики обработки узлов при ремонтных и профилактических работах, достижимых технических и экономических результатов.

Рассмотрим наиболее существенные особенности петротриботехнического метода на примере его реализации с помощью НИОД™.

В настоящее время в промышленности используются две марки НИОД™ — НИОД-2 и НИОД-5. Они изготавливаются из серпентинитов разных месторождений и различаются по своим антифрикционным свойствам.

НИОД™ представляет собой порошкообразное вещество, включающее в себя тонко растертый (до 5—50 мкм) серпентинит, поверхностно-активные вещества и катализаторы. Обработка узлов обычно производится путем введения состава в зону трения с помощью штатной смазки в процессе работы механизма. После образования покрытия излишки состава удаляются.

Долговечность покрытия после разовой обработки узлов трения в различных механизмах варьирует в пределах от полутора до нескольких лет. После изнашивания покрытие восстанавливается путем повторной обработки узлов НИОД™.

Покрытие характеризуется прочным сцеплением с металлом, на поверхности которого оно образовалось. Толщина покрытия составляет порядка 20—30 мкм и может регулироваться в процессе обработки узлов трения. Скорость его формирования пропорциональна локальному давлению и температуре в пятне контакта. Поэтому вызванные износом биения стимулируют его наращивание на наиболее изношенных участках поверхности деталей. В результате происходит восстановление размеров и формы изношенных деталей.

На способности восстановления изношенных деталей механизмов основано одно из важнейших направлений использования НИОД™ — так называемый «ремонт без разборки». Восстановление деталей и узлов производится без

прекращения эксплуатации механизмов. Это позволяет избежать издержек, связанных с простоями машин при замене изношенных деталей новыми. Стоимость «ремонта без разборки» не превышает 5—15 % от стоимости новых деталей или узлов.

В результате обработки достигается разделение поверхностей металлических пар. Поверхности деталей приобретают улучшенные антифрикционные характеристики. Покрытие обладает низкими значениями шероховатости. Кроме того, обеспечивается выравнивание твердости поверхностей сопрягаемых деталей, что повышает износостойкость узлов.

Покрытие снижает зависимость трибоузлов от качества материалов, из которых сделаны детали. В ремонтной практике НПИФ «Энион-Балтика» это свойство неоднократно использовалось при замене вышедших из строя деталей уникального оборудования, изготовление которых требует специальной закалки или использования редких сплавов, «сырыми», но с обработанной НИОД™ поверхностью.

Положительный результат достигается, как правило, в парах трения любых металлов. Степень снижения трения и износа зависит от конкретного сочетания материалов в узлах трения, от конструктивных особенностей механизмов, от режимов их эксплуатации, от применяемой марки НИОД™ и от других факторов. В зависимости от различных условий коэффициент трения снижается как минимум в 3 раза, достаточно часто в 10—15 раз, а иногда в 40 раз; скорость изнашивания — минимум на 20—40 %, в большинстве случаев в 3—8 раз, иногда в 15 раз. В некоторых случаях обработка узлов трения с помощью состава НИОД™ позволяет осуществлять в дальнейшем их эксплуатацию «на сухую», т. е. вообще без смазочных материалов, в течение длительного времени (от полугода и более).

Необходимо подчеркнуть, что технологические особенности обработки узлов механизмов в каждом конкретном случае либо выясняются экспериментально, либо определяются на основании имеющегося опыта. Точно так же определение параметров реализуемых трибосистем до сих пор основывается только на эмпирических исследованиях.

Полезными следствиями снижения коэффициента трения является уменьшение нагрева узлов механизмов и не-производительных потерь энергии на трение. С этим, в свою очередь, связано сокращение потребления топлива и электроэнергии. Повышение износостойкости механизмов ведет к увеличению сроков их службы, снижению вероятности аварийных разрушений оборудования, сокращению затрат на внеплановые ремонты, запасные части и комплектующие. Применение технологии улучшает и экологические характеристики механизмов за счет сокращения расхода смазочных материалов, оптимизации условий сгорания топлива и т. д.

Первоначально «серпентинитовые» триботехнические технологии применялись только в ремонтных целях. Это особенно актуально в России, где подавляющее большинство используемых технических средств превысило свой ресурс в 1,5—2 раза. Позднее метод стал применяться как профилактическое средство при обкатке новых или прошедших капитальный ремонт машин. Последние годы НПИФ «Энион-Балтика» ведет активную деятельность по внедрению метода в производственные процессы на машиностроительных предприятиях. Начаты работы по конструированию принципиально новых узлов и механизмов, адаптированных к реализуемым в трибосистемах благодаря применению петротриботехнического метода условиям трения. В частности,

разрабатываются механизмы, предназначенные для эксплуатации в «сухом» режиме.

Новые приложения петротриботехнического метода особенно остро ставят вопрос о необходимости совершенствования его теоретической базы. Повышение эффективности метода в промышленности требует умения *сознательно управлять* свойствами трибосистем. В этих условиях сугубо эмпирический подход к технологическим разработкам становится серьезным препятствием для развития метода.

В 1994 г. в качестве рабочей гипотезы для случая обработки стальных пар трения 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.

Согласно этой схеме в процессе действия состава НИОД™ условно выделяются несколько фаз. На начальном этапе происходит очистка и микрошлифование поверхностей пар трения частицами триботехнического состава. Одновременно выступы микрорельефа перемещающихся поверхностей измельчают частицы состава до размеров, соизмеримых с размерами форм рельефа. Под действием контактного давления поверхностей трения измельченные частицы вдавливаются в отрицательные формы рельефа. Поверхностно-активные вещества способствуют плотному контакту частиц состава с поверхностью металла. При трении в процессе разрушения выступов рельефа происходит выделение тепловой энергии. При этом в точках слома выступов локальное повышение температуры может составлять 400—1100 °С. 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. Эффект безызносности реализуется за счет снижения шероховатости и выравнивания твердости поверхностей пар трения.

Главные недостатки рассмотренной модели заключаются в том, что она не дает информации о вещественном составе и строении покрытия, о зависимости его свойств от условий обработки и от свойств главных компонентов составов НИОД™ — серпентинитов. Соответственно, ее прогностические возможности недостаточны для целенаправленного развития технологии.

По мнению авторов статьи, существенные резервы для разработки *специальной теории петротриботехнического метода обработки металлов* кроются в изучении влияния собственных свойств серпентинитов на свойства трибосистем.

Серпентиниты как сырье для петротриботехники

Систематическое изучение свойств серпентинитов как сырья для петротриботехники пока не проводилось. В то же время специалистам НПИФ «Энион-Балтика» прекрасно известно, что минеральный и химический состав серпентинитов оказывает определяющее влияние на свойства и качество конечного продукта. Подбор сырья до сих пор осуществляется только путем экспериментальных проверок пригодности серпентинитов из различных эксплуатирующихся месторождений.

К серпентинитам относятся горные породы с очень широкими вариациями минерального и химического состава. Это связано с их генетическими особенностями. Серпентиниты образуются в результате гидротермально-метасоматических преобразований бесполевошпатовых ультраосновных горных пород за счет замещения минералами группы серпентина железо-магнезиальных силикатов — оливинов, ромбических, реже моноклинных пироксенов, моноклинных амфиболов. Наиболее крупные массивы серпентинитов образуются в результате серпентинизации гипербазитов, преимущественно гарцбургитов и дунитов. Кроме того, серпентиниты могут возникать при воздействии связанных с интрузиями гранитоидов или пород основного состава гидротерм на карбонатные породы. Серпентинизация также подвергаются железо-магнезиальные силикаты магнезиальных скарнов, кальцифиров, карбонатитов.

Серпентиниты обычно наследуют некоторые признаки материнских пород. Это выражается, например, в сохранении реликтов первичных минералов (рис. 1—3). В апогипербазитовых серпентинитах часто встречаются реликты оливинов, пироксенов, амфиболов и рудных минералов (хромита, магнетита, сульфидов меди, никеля, кобальта и железа). При серпентинизации железо-магнезиальных силикатов железо, не вошедшее в состав новообразованного серпентина, выделяется в форме вторичного магнетита, зерна которого размером 1—10 мкм «распылены» в кристаллах и агрегатах серпентина. Содержание железа в апогипербазитовых серпентинитах составляет не менее 1,5 % в пересчете на FeO. Апокарбонатные серпентиниты, как правило, маложелезистые ($Fe < 1,5 \%$). В серпентинитах, образованных при замещении кальцифиров, карбонатитов и магнезиальных скарнов, сохраняется первичный кальцит.

Серпентинизация при понижении температуры закономерно сменяется процессами, приводящими к вторичным изменениям состава серпентинитов (рис. 4—7). Минералы серпентинитов подвергаются замещению хлоритами, железо-магнезиальными карбонатами (магнезитом, брейнеритом), бруситом, тальком. В следующую стадию процесса высвобождающаяся при карбонатизации кремнекислота выделяется в виде кварца и халцедона, что обуславливает образование лиственитов — карбонат-кварцевых пород с примесью пирита, а также вторичных хлоритов, талька и серпентина, иногда фуксита, серцинита, рутила и других минералов. Наиболее низкотемпературные процессы аргиллизации или выветривания приводят к образованию глинистых минералов. В результате проявления поздних гидротермально-метасоматических процессов формируются сложные смешанослойные срастания минералов группы серпентина с другими слоистыми силикатами — тальком, хлоритами, каолинитом, смектитами.

Как правило, к серпентинитам относят горные породы, в составе которых на минералы группы серпентина приходится не менее 70—80 %. Абсолютно свободных от примесей мономинеральных серпентиновых пород в природе не встречается. Количество разнообразных примесей составляет в серпентинитах не менее 5—15 %. Их состав и количество сильно варьируют не только в пределах одного месторождения, но и в пределах очень малых объемов горных пород.

Априорная оценка влияния минерального состава серпентинитов на возможность их использования в петротриботехнике затрудняется отсутствием надежных сведений о механизмах процессов, происходящих при обработке металлов.

Ключевыми в данном случае являются следующие вопросы. Сохраняются ли в составе новообразованного покрытия первичные минералы серпентинитов? На сколько различаются по фазовому составу покрытие и исходное вещество состава НИОД™? На сколько существенна роль высокотемпературных процессов, приводящих к термической деструкции минералов серпентинитов или микрометаллургическим явлениям, в формировании защитного покрытия?

По ряду не обсуждаемых в данной статье соображений, мы придерживаемся гипотезы, что защитные и антифрикционные свойства покрытия обеспечиваются именно благодаря сохранению фазового состава серпентинитов, а микрометаллургические процессы и термическое разрушение слоистых силикатов с образованием обезвоженных фаз имеют негативные последствия. Попробуем оценить с этой точки зрения влияние состава серпентинитов на качество петротехнической обработки металлов.

Идеальная кристаллохимическая формула серпентина — $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$. Группа серпентина включает в себя несколько десятков его разновидностей, главными среди которых традиционно считаются хризотил (волокнистый), антигорит и лизардит (пластиначатые). В природных серпентинитах обычно одновременно присутствуют разные модификации серпентина.

Серпентины относятся к группе триоктаэдрических слоистых силикатов. Кристаллическая структура серпентина представлена двухэтажными слоями, образованными кремнекислородной тетраэдрической и бруцитоподобной октаэдрической сетками, сочлененными через общие вершины. В кристаллической решетке серпентина существует значительное несоответствие размеров тетраэдрической и октаэдрической сеток. Компенсация несоразмерности структурных сеток может осуществляться в плоских (лизардит), цилиндрически изогнутых (хризотил) и волнообразных с переменным направлением изгиба (антигорит) слоях (рис. 8). Полиморфные разновид-

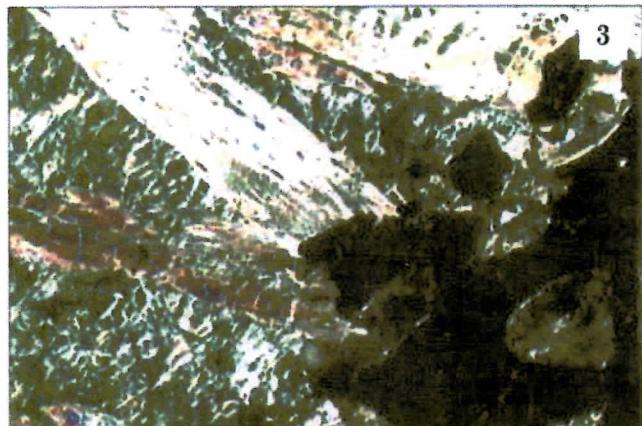
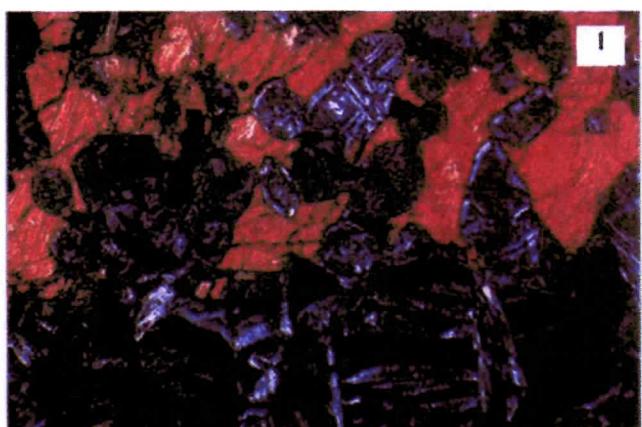


Рис. 1. Аповарилитовый серпентинит с реликтовым ойкокристаллом пироксена

Увел. 30, с анализатором. Фото А. В. Ващёника

Fig. 1. Apoverlite serpentinite with relics of pyroxene oikokristals

Рис. 2. Серпентинизированный дунит. Присутствуют реликты оливина

Увел. 11, с анализатором
Здесь и далее фото И. В. Таловиной

Fig. 2. Serpentinous dunite. There are relics of olivine

Рис. 3. Реликтовый магнетит в серпентините. Лейстовидные монокристаллы — антигорит, спутанно-волокнистые агрегаты основной массы — хризотил

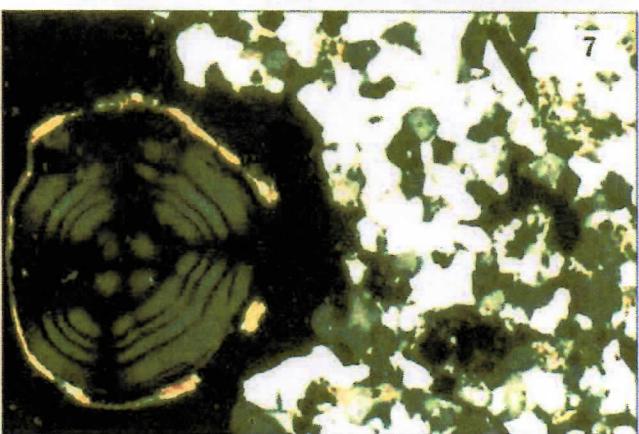
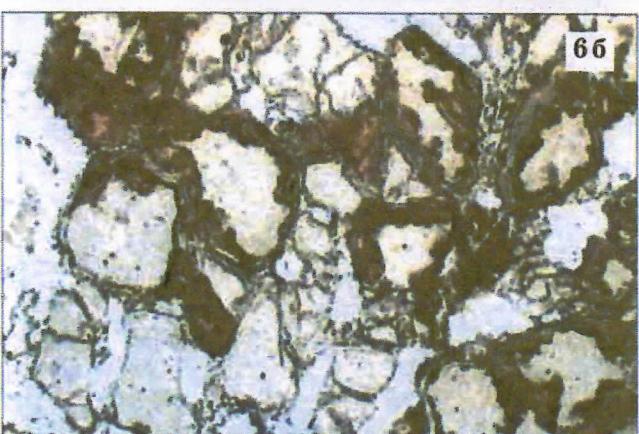
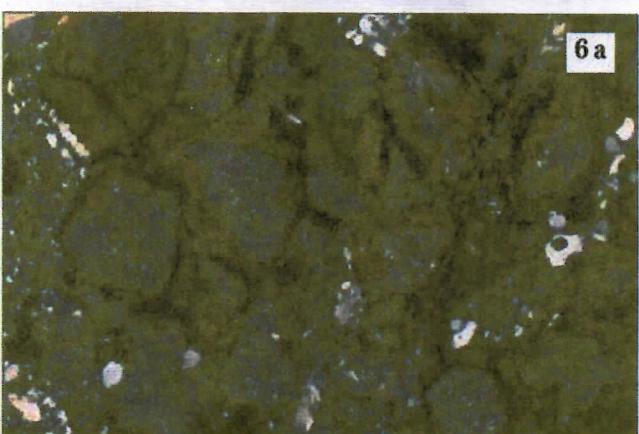
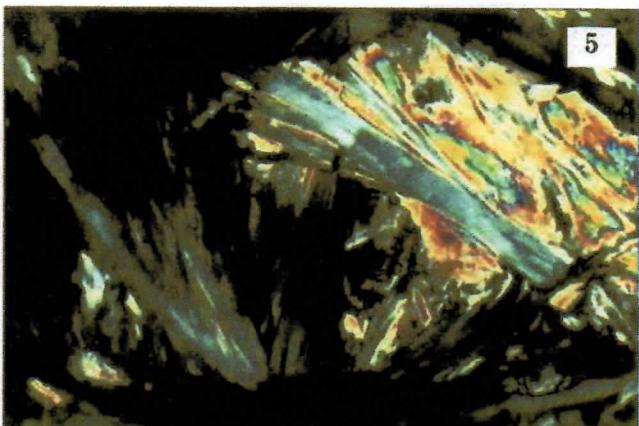
Увел. 11, с анализатором

Fig. 3. Relic magnetite within serpentinite. Lath-like monocrystals — antigorite, felted matrix — chrysotile

Рис. 4. Аподунитовый серпентинит. Структура сетчато-петельчатая. Серпентин частично замещен смешанослойными образованиями тальк-серпентин-хлоритового состава

Увел. 11, с анализатором

Fig. 4. Apodunite serpentinite. Net-looped-like texture. Serpentine is partly replaced by mixed-layered talc-serpentine formations



ности серпентина обладают устойчивыми отличиями в химическом составе.

В серпентинах Si может замещаться на Al, а Mg — на Al, Mn²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺, Ni. Ионы Mn²⁺, Fe²⁺, Fe³⁺ присутствуют в минералах серпентина в высоких концентрациях и оказывают заметное влияние на их механические свойства (такие, как твердость, способность к истиранию), величину относительной диэлектрической проницаемости, магнитной восприимчивости, теплопроводности. Эти характеристики важны, поскольку при повышении температуры в узлах трения происходит смещение 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 стали; низкая теплопроводность способствует высокой термостойкости покрытия.

Волокна хризотил-асбеста имеют сопротивление на разрыв почти такое же, как у некоторых сортов стали. Хризотиловый асбест весьма устойчив к нагреванию, только при температурах выше 400 °C минерал постепенно становится более хрупким. Волокнистая структура затрудняет адгезию серпентина к металлам. Очевидно, присутствие хризотил-асбеста в составе серпентинитов ухудшает свойства трибосоставов.

Пластинчатые серпентины, в особенности антигорит — наиболее стабильная и устойчивая к механическому воздействию и высоким температурам модификация, более благоприятны для формирования покрытия. Хлориты, тальк, гидроталькит и другие слоистые железо-магнезиальные 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 рядами связи слабее, а значит силы, необходимые для сдвига слоев частиц трибосостава, меньше силы связи с металлом. Абсолютная спайность обеспечивает плотное соприкосновение частиц с поверхностью металла за счет сил межкристаллического взаимодействия. Высокая твердость слоистых силикатов по α -плоскости способствует сопротивлению изнашиванию и высокому пределу текучести защитного покрытия.

Рис. 5. Смешанослойные срастания талька и антигорита
Увел. 15, с анализатором

Fig. 5. Mixed-layered intergrowths of talc and antigorite

Рис. 6. Лиственитизированный серпентинит. Вторичные минералы: кварц, хлорит, никельсодержащий серпентин, сидерит, гидроокислы железа
Увел. 15, а — с анализатором, б — без анализатора

Fig. 6. Listvenitized serpentinite. Secondary minerals: quartz, chlorite, nickel-containing serpentine, siderite, ferric hydrates

Рис. 7. Никелевый серпентин конкремционного строения в окварцованным серпентините
Увел. 11, с анализатором

Fig. 7. Nodulose nickel serpentine within silicified serpentinite



Рис. 8. Схематическое изображение структурных модификаций серпентина. По В. П. Лютоеву (2000), с упрощениями
а — лизардит, б — антигорит, в — хризотил-асбест; I — октаэдрическая сетка, II — тетраэдрическая сетка

*Fig. 8. Schematic image of structural modifications of serpentine.
By V. P. Lutoev (2000), simplified*

Микрокристаллические вростки магнетита в чешуйки серпентина усиливают его способность к аутогезии магнитного происхождения. Крупные реликтовые зерна магнетита и хромшпинелидов, наоборот, отрицательно влияют на износ деталей в силу своей высокой твердости, а значит «абразивности».

Глинистые минералы, в составе которых содержится алюминий, вероятно, оказывают негативное влияние на свойства трибосоставов. Алюмосиликаты не обладают такой высокой адгезией к сталим, как магнезиальные силикаты, и это увеличивает вероятность отслаивания защитного покрытия.

Присутствие брусита и кварца в триботехнических составах, по всей видимости, влияет положительно на их свойства. Формула брусита $Mg(OH)_2$. Брусит обладает слоистой структурой и совершенной спайностью по (0001), механически легко разрушается, не проводит электричество. Это сравнительно низкотемпературный минерал, который при разложении дает необходимые для процессов ионообмена магний и воду. Высокие пьезоэлектрические свойства кварца способствуют подавлению трибоэлектрического эффекта. При этом его пьезоэлектрические характеристики в широких пределах не зависят от изменения температуры (пьезо свойства кварца теряют при температуре выше 520 °C). Кварц обладает также хорошими изоляционными свойствами.

Приведенные примеры отнюдь не исчерпывают весь спектр возможных факторов влияния собственных свойств серпентинитов на характеристики триботехнических составов, но достаточны для следующих выводов.

1. При разработке критерии оценки серпентинитов как сырья для петротриботехники требуется особый, качественно иной подход, чем при оценке серпентинитов, использующихся в других отраслях промышленности.

2. Вполне вероятно, что оптимальными характеристиками для производства петротриботехнических составов обладают серпентиниты месторождений, которые до сих пор не рассматривались как объекты, перспективные для промышленной разработки.

Заключение

В статье рассмотрен новый метод обработки металлов, создание которого явилось результатом многолетних экспериментальных исследований по применению в триботехнике неметаллических полезных ископаемых. Наряду с оригинальным техническим воплощением особенностью метода является использование естественных полиминеральных горных пород, что мы и стремимся подчеркнуть, предлагая для него название «петротриботехнический».

За прошедшее десятилетие однозначно доказана высокая экономическая эффективность петротриботехнических технологий, порождающая высокий спрос на них в различных отраслях промышленности. С другой стороны, существенным тормозом развития метода является крайне слабая его теоретическая база.

Сложившаяся ситуация является следствием очень болезненного для нашей страны явления — нарушения структуры связей между промышленными предприятиями, потребляющими полезные ископаемые, и подразделениями горно-геологической службы. В данном конкретном случае развитию петротриботехнического метода препятствует необеспеченность работников технических специальностей информацией о свойствах полезных ископаемых, с помощью которых он реализуется.

В разделе геологии, именуемом учением о месторождениях полезных ископаемых, в группу индустриального неметаллического сырья включены полезные ископаемые, используемые в промышленности в естественном виде, без химической переработки. Их собственные свойства оказывают определяющее влияние на качество конечных промышленных изделий, что необходимо учитывать при организации их поисков, разведки, добычи, переработки и применения в промышленности. Использование неметаллов в промышленности базируется на выработке строгих узкоспециализированных марок сырья и разработке жестких требований к полезному ископаемому, часто по многим параметрам.

Анализ проблемы с позиций учения о месторождениях полезных ископаемых показывает, что для создания специальной теории петротриботехнического метода необходимо установление зависимостей между свойствами минерального сырья и конечной продукции. Наиболее эффективным направлением развития петротриботехнических технологий является разработка узкоспециализированных марок триботехнических составов из соответствующих видов сырья.

Авторы выражают искреннюю благодарность Дмитрию Михайловичу Телуху и Рамзаю Александровичу Жукову за консультационную помощь в работе над статьей.

Алексей Валентинович ВАЩЁНОК — руководитель опытно-методической группы Участка новых технологий СЗ ГГП «Севзапгеология». Тел. (812) 352-30-15

Виталий Викторович КАЗАРЕЗОВ — коммерческий директор НПИФ «Энион-Балтика». Тел. (812) 589-90-85. Тел./факс (812) 589-90-88

Ирина Владимировна ТАЛОВИНА — кандидат геолого-минералогических наук, ассистент кафедры исторической и динамической геологии Санкт-Петербургского государственного горного института

Виталий Викторович КОСТЕНКО — ведущий геолог Участка новых технологий СЗ ГГП «Севзапгеология»