
Математика и механика. Физика

УДК 621.81:620.169.1+001.891

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ, УЗЛОВ И МЕХАНИЗМОВ НА НАНО-, МЕЗО- И МАКРОУРОВНЯХ

Ю.С. Саркисов, В.А. Аметов, И.А. Курзина, Ю.А. Власов

Томский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: yury2006@yandex.ru

Рассмотрены подходы к созданию новых материалов и процессов для повышения долговечности элементов транспортных машин, основанные на методологии неравновесного материаловедения. Развиваемый подход позволяет управлять поведением трибологических систем «агрегат-масло» на микро-, мезо- и макроуровнях уровнях организации пограничных слоев.

Ключевые слова:

Синергетика, композиционные материалы, надежность, трение, износ, коррозия, масло.

Key words:

Synergetic, composite materials, reliability, durability, friction, deterioration, corrosion, oil.

В настоящее время мы являемся участниками и очевидцами формирования новой парадигмы в материаловедении, связанной с переходом от моно- и малокомпонентных систем к многокомпонентным композициям, от принципов равновесного — к принципам неравновесного материаловедения, от аддитивности к синергетике создания и функционирования целого [1]. Бурное внедрение синергетики во все фундаментальные и прикладные науки, в образование, культуру и общественные процессы, в том числе в материаловедение, безусловно, стимулировало поиск и разработку более эффективных технологий создания материалов нового поколения с принципиально иным взаимодействием с окружающей средой. Создание этих технологий можно рассматривать с позиций равновесного и неравновесного материаловедения.

Принципы равновесного материаловедения отвечают концепции устойчивого (стабильного) существования материалов, основанных на сохранении их эксплуатационных свойств как можно дольше во времени. Долговечность материалов достигается путем обеспечения инертности (пассивности) материала по отношению к переменным факторам окружающей среды. Равновесные материалы полностью отвечают методологии: «состав — структура — свойства». Стабильность последних

поддерживается устойчивостью состава и структуры материала к воздействию факторов окружающей среды.

Для динамических систем типа, «механизм-масло» необходимо обеспечение активного взаимодействия элементов системы с окружающей средой, их непрерывная адаптация к условиям эксплуатации, самодостраивание, самовосстановление свойств, самоконтроль функционирования и корректировка поведения. Долговечность материала здесь рассматривается не как долговечность материала сама по себе, а как долговечность системы «материал — окружающая среда». В этом случае более правильно, на наш взгляд, говорить не о способности сохранения свойств материала во времени, а о поведении материала, о характере изменения свойств, о совместимости, дополнительности, разделении и самосогласовании функций и способности материала перестраивать свою структуру и свойства в зависимости от вида и, наконец, о степени внешнего воздействия. Такие материалы неравновесны по своей природе. Для их создания необходима другая методология — методология неравновесного материаловедения, а именно «состав — структура — свойства — организация — функция — поведение» [2]. К важнейшим принципам неравновесного материаловедения можно также

отнести синергизм сильных и слабых воздействий и методов обработки и модифицирования материалов, полимасштабность процессов формирования структуры и свойств, равновесно-неравновесный фактор [3], единство и противоположность поверхностных и объемных свойств, их дополнительность и взаимообусловленность и другие.

Полимасштабность позволяет условно рассматривать любой материал независимо от его природы как композит, как многослойное образование на микро-, мезо- и макроуровнях взаимодействия. Очевидно, что объемный, приповерхностный и поверхностные слои материала можно рассматривать как три самостоятельные псевдофазы, для каждой из которых характерны свои специфические свойства. Непрерывный переход от объемных к поверхностным свойствам сопровождается увеличением подвижности частиц, изменением l/d -фактора, где l – расстояние между частицами, d – диаметр частиц [4]. При изменении S/V -фактора (S – поверхность, V – объем) соответственно изменяется соотношение между дисперсностью и пористостью материала, включая нанодисперсность и нанопористость структуры [5]. Совместимость слоев в таком композите практически идеальная. Эти слои можно считать гомогенными структурами. В гетерогенных композитах состав, структура и свойства слоев могут существенно отличаться друг от друга. В этом случае проблема совместимости слоев становится определяющей.

Совместимость может быть пассивной и активной. Например, в железобетоне на макроуровне композит представлен бетоном и арматурой, совместимость которых пассивна, их совместная работа не приводит к изменению свойств отдельных компонентов, обеспечивая долговечность материала в целом. В активных композитах функционирование одного слоя немыслимо без учета свойств и поведения других слоев, а также без влияния окружающей среды. В этом случае один слой поддерживает существование другого ради сохранения целого.

С развитием химии привитых поверхностных соединений [6, 7] существенно расширяются возможности создания и управления свойствами композитов. Отличительной особенностью таких материалов является то, что привитые поверхностные соединения определяют только их химические свойства, тогда как физические свойства соответствуют параметрам подложки. Толщина слоев привитых поверхностных соединений, как правило, ничтожна по сравнению с толщиной материалов, а свойства его поверхности при этом могут быть кардинально изменены. Например, гидрофильную поверхность легко превратить в гидрофобную, и наоборот.

Такие объекты находят все более широкое применение в самых различных областях современной науки, техники и технологии, благодаря наличию в них уникальных свойств. Особо широкие возмож-

ности синтеза таких материалов возникают в многокомпонентных системах. Многокомпонентность – необходимое условие создания неравновесных материалов, полифункциональности их свойств, резерва структурообразования, долговечности и работоспособности изделий на их основе, способных направленно перестраивать свою структуру и свойства в зависимости от условий окружающей среды.

Таким образом, развиваемый нами концептуальный многоуровневый подход к созданию новых материалов предполагает рассмотрение любого исследуемого процесса или поведения системы на трех принципиально различных уровнях организации вещества: на микро-, мезо- и макроуровнях, причем каждый из них в свою очередь может быть разбит соответственно на микро-, мезо- и макроподуровни. При этом пограничные слои, так называемые переходные слои между соседними уровнями и подуровнями, например, между микро- и мезоуровнями, представляют собой практически новое состояние некоторого гибридного (комбинированного) уровня, который, по-видимому, можно считать автономным. Отсюда вытекает, что гибридные уровни являются важной составляющей организации вещества, так как они наследуют признаки соседних («родительских») уровней. Вот почему, если искусственно создавать в исследуемой системе наноструктурные состояния, то в них может возникать целый комплекс сопряженных явлений, характерных как для одного, так и для другого уровня (или подуровня).

Согласно современной концепции естествознания в целом и развиваемому подходу в частности, отдельные идеи, теоретические положения и закономерности одной ее составляющей с успехом можно применять для прогнозирования свойств и поведения систем в другой, так как глобальные механизмы протекания процессов подобны. Например, явления в системах «цемент-вода» и «металл-смазка» во многих аспектах подобны, так как эти системы являются разновидностями более общей системы «твердое тело-жидкость». Когда те или иные системы различной природы являются частью более общей системы, то их можно изучать и описывать с позиции теории подобия, тем более, что теория подобия и методы модельных уравнений известны уже давно. По этой причине, достижения в одной области могут служить основой для прогнозирования достижений и будущих открытий в другой. Это означает, что многие достижения физической мезомеханики могут с успехом быть применены для прогнозирования процессов в конденсированном состоянии. Например, механизм зарождения и эволюции дефектов структуры в цепочке «сдвиг – поворот – вихрь – деформация» [8]. Явления возникновения электромагнитного излучения при диспергировании цемента в воде на стадии образования тонкокристаллической структуры [9] и диспергирование частиц цемента в воде при

электромагнитной обработке могут быть также обнаружены в системе «металл-смазка».

Идея многомасштабности явлений в нефтяных смазочных материалах (НСМ) при эксплуатации трибологических систем «агрегат-масло» (ТСАМ) была сформулирована нами как концепция структурных уровней старения масла [10]. Структурные уровни относятся к классу микро-, мезо- и макро-масштабов. При этом не всегда осознается, что многоуровневый подход является новой парадигмой, качественно отличной от одноуровневого или двухуровневых подходов к описанию рассматриваемых явлений, применявшихся до сих пор. В последние годы стало ясно, что дальнейший прогресс в понимании процессов невозможен до тех пор, пока все иерархические уровни старения НСМ не будут рассматриваться как единое целое, пока не будут установлены закономерности взаимодействия различных уровней между собой и их влияние на функциональную способность всей системы в целом.

Обоснование методологии самосогласования процессов старения на различных масштабных уровнях позволило построить многоуровневую механику функционирования НСМ в ТСАМ на протяжении всего жизненного цикла. При этом процессы старения рассматриваются нами как эффект накопления и суперпозиции трансляционных превращений в среде с последующим изменением ее свойств. Формирующиеся на различных структурных уровнях разориентированные субструктуры являются масштабным инвариантом, а качественное и количественное изменение состава среды — движущей силой процесса. Применение данного подхода означает переход от континуального описания, где среда представляется семейством материальных точек, к дискретному, где дисперсная система рассматривается как совокупность микро-, мезо- и макрообъемов во всей иерархии масштабов. Систему «агрегат-масло» следует рассматривать с позиции синергетических законов поведения неоднородных неравновесных целостностей, претерпевающих локально-структурные превращения и стремящихся к равновесию путем формирования на полимасштабных уровнях диссипативных структур. Последние являются источниками эстафетного распространения локального структурного и вещественного превращения в полях градиентов напряжений и химических потенциалов во всем объеме материалов [11].

Превращение на более высоком масштабном уровне происходит самосогласованно в информационно-энергетическом смысле со всеми ниже лежащими структурными уровнями с учетом непрерывной эволюции структуры и состава исходной дисперсной системы. Управлять свойствами такой системы можно путем оптимального соотношения сильных и слабых воздействий, первые из которых направляют процессы в системе, а вторые, не изменяя кардинально свойств дискретных образова-

ний, способствуют только их самоорганизации [12, 13].

В трибологической системе «агрегат-масло» роль гибридных слоев играют, согласно Б.И. Костецкому и А.С. Ахматову [14, 15], вторичные структуры (ВС). Формирование ВС, как показано Б.И. Костецким, термодинамически неизбежный акт пассивации активированных трением поверхностных слоев твердых тел. Возникающая новая фаза ВС защищает исходный материал от механической и физико-химической деструкции, а процесс образования и разрушения таких структур находится в динамическом состоянии перехода от одного метастабильного состояния к другому. Микроскопические процессы, как правило, происходят согласованно. Они взаимно усиливают комплиментарные взаимодействия друг с другом, по этой причине деформационные, тепловые, адсорбционные, диффузионные и целый ряд других процессов проявляются как единое, целое, выражающееся в определенном поведении системы. Как считает Б.И. Костецкий, возникновение диссипативных структур есть термодинамическая основа фундаментальных закономерностей трения, смазочного действия и износа, а образование гаммы ВС — их материаловедческая основа.

Управление структурой и свойствами ВС на любом уровне их организации подчиняется теории открытых каталитических систем. Это означает, что при реализации структурной приспособляемости в системе «агрегат-масло» в первую очередь перестраивается структура поверхностных слоев, переходя в метастабильную форму, энергетически наиболее полно соответствующую создавшимся условиям нагружения. При этом очень важно отметить, что различные типы ВС, отличающиеся по своему составу, структуре, фазовому равновесию, находятся на разных стадиях их формирования и распада. Это открывает новые принципиальные возможности управления рассматриваемыми процессами. Очевидно, что для оптимизации процесса эксплуатации НСМ в ТСАМ и повышения ее работоспособности необходимо снижать затраты энергии начала формирования гаммы ВС и создавать условия для увеличения энергии, необходимой для их разрушения. В этом суть структурно-энергетического подхода в трибонике, позволяющего регулировать фрикционные свойства и поверхностную прочность ВС [16, 17].

Проблема достижения эффекта безызносности при трении деталей транспортных машин, является одной из самых актуальных задач современного машиностроения. Однако традиционные равновесные материалы не отвечают возросшим требованиям современного транспортного машиностроения. В основе его лежит огромный предшествующий опыт разработки материалов на основе синтеза равновесных систем. Практика показывает, что во многих случаях принципы равновесного материаловедения либо не применимы, либо имеют

серьезные ограничения в возможностях их реализации. Например, эксплуатация равновесных материалов в машинах при высоких температурных, скоростных и нагрузочных внешних воздействиях лимитируется множеством факторов, в числе которых трение и износ, потери несущей способности, окисление и испарение масла, и другие явления. При этом происходит постоянная смена поверхностных слоев металла, изменение качественных характеристик и загрязнение масла, попеременное формирование и разрушение защитных вторичных структур, требующих для успешного функционирования ТСАМ оптимальных условий и ее адаптации к постоянно меняющимся факторам внешних воздействий. Для решения таких задач необходимо:

- использование принципов неравновесного материаловедения [18, 19];
- создание неравновесных материалов, которые следует рассматривать как некоторое подобие биологических объектов, в том числе их сопряженных элементов. Любой биологический объект представляет собой типично неравновесный материал, способный адаптироваться к изменению условий окружающей среды путем интенсификации процессов внутри локальной системы, адекватных внешнему воздействию. Основной задачей неравновесного материаловедения в транспортном машиностроении является создание защитных слоев на поверхности металла трущихся деталей, способных перестраивать свою структуру и свойства в зависимости от степени внешнего воздействия.

С позиций физико-химической механики эффективно управлять свойствами рассматриваемых систем можно, осуществляя комплекс мероприятий:

- а) непосредственно в самом металле;
- б) непосредственно в смазочной среде;
- в) на границе раздела фаз «металл – смазочная среда».

С учетом технико-экономической целесообразности наиболее эффективными, безусловно, будут комбинированные мероприятия «а», «б» и «в» при их рациональном сочетании.

Изучению и осуществлению мероприятий типа «а» и «б» посвящено достаточно большое число работ. Это – легирование металлов с целью их упрочнения и повышения износостойкости, разработка присадок в масла, управление их свойствами в процессе использования путем физико-химического модифицирования и т. д.

Однако наиболее эффективными мероприятиями в предложенной выше классификации, на наш взгляд, являются два последних метода управления, причем, в первую очередь, управление через смазочное масло как технологически наиболее доступной части трибосистемы для физико-химического модифицирования.

Новизна развиваемого нами подхода состоит в пересмотре роли и назначения смазочного материала в трибосистеме в условиях граничного трения и заключается в следующем. Смазка, на наш взгляд, должна не просто разделять поверхности трения друг от друга, оставаясь при этом инертной по отношению к ним. Скорее, наоборот, она должна обладать некоторым комплексом свойств, способствующим своевременному образованию защитных слоев приповерхностного «ворса», сервоитной пленки и т. д. Ведь именно в этих слоях реализуется особый механизм деструктивных и структурирующих процессов, протекающих без накопления дефектов, характерных для усталостных явлений на поверхностях трения. Учитывая данные о том, что непосредственный контакт жидкой и твердой фаз начинается с процессов смачивания и постепенного диффундирования поверхностно-активных веществ и присадок в объем жидкой фазы, скорость диффузии частиц смазочной среды в поверхностном слое металла должна быть не ниже скорости протекания в них химических реакций. В противном случае в зоне контакта устанавливается локальное равновесие. Многообразие вещественного состава твердой фазы (частицы износа, пыли, продукты старения масла) обеспечивает условия, когда смазка и формирующийся сольватный раствор будут находиться в состоянии равновесия с одной группой элементов или отдельных компонентов системы и не равновесны по отношению к другой группе частиц твердой фазы. Последовательность образования компонентов и фаз, с которыми масло не равновесно, меняется в зависимости от конкретных условий на протяжении сравнительно длительного периода. Неравновесные частицы растворяются и на их месте формируются частицы новой фазы. Возникающая при этом (новая) тонкокристаллическая структура наиболее равновесна по отношению к маслу, чем предыдущая. Для того, чтобы вновь изменился состав среды и восстановилось исходное состояние равновесия, необходимо определенное время.

Состав новообразований (на трущихся поверхностях) может существенно отличаться от исходных зерен металла и зависит от природы и условий взаимодействия в трибосистеме. Разнообразие химических реакций в последней определяет вторичное фазообразование и стадийность протекающих процессов. Образование новой фазы неизбежно ведет к изменению физико-химических параметров (смазочной) среды, которая, будучи ранее равновесной, по отношению к той или иной фазе, может стать неравновесной к ней и оказаться источником нового фазообразования. Этот процесс носит затухающий характер вплоть до установления общего равновесия в системе. Таким образом, равновесно-неравновесный фактор – неперемнное условие эволюции и высокой работоспособности любой трибосистемы.

С физико-химической точки зрения элементарным актом деструкции поверхности металла явля-

ется процесс его ионизации $Me^{\circ} - ne^{-} = Me^{n+}$, а его обратный процесс, напротив, является структурирующим фактором. Следовательно, изменяя параметры ионизации и сродства к электрону металлов, можно управлять поведением трибосистем на микроуровне. Главное при этом соблюсти такое динамическое состояние трибосистемы, когда совокупность структурообразующих факторов превалирует над деструктивными.

В самопроизвольном состоянии взаимодействие между поверхностями пар трения и смазки подчиняется правилу Ле-Шателье: металл стремится ослабить внешнее воздействие смазочной среды, а нефтяное смазочное масло, в свою очередь, стремится ослабить внешнее воздействие металла. При этом деструктивные процессы протекают с обеих сторон. Со стороны металла наблюдаются процессы разрушения поверхностного слоя, сопровождающиеся уменьшением плотности и сопротивления сдвигу, а со стороны смазочного материала, наоборот, упрочнение структуры прилегающих к поверхности твердой фазы слоев, увеличение плотности и сопротивления сдвигу. Это наблюдается до тех пор, пока на границе раздела фаз не сравняются значения этих параметров. Описываемые процессы на границе раздела фаз формируют особую многослойную вторичную структуру, свойства которой существенно отличаются от первоначальных свойств металла и смазки. В частности, обнаружено, что в результате такой «структурной приспособляемости» микротвердость поверхностного слоя материала может повыситься в 2...4 раза [20].

Итак, на наш взгляд, образование устойчивых вторичных структур является основным условием соблюдения постоянства равновесно-неравновесного фактора в трибосистеме. Исходя из этого, стратегия управления долговечностью современных машин и механизмов должна состоять в регулировании скоростей взаимодействия твердой и жидкой фаз, формирующих свойства вторичных (защитных) структур.

Однако нельзя не учитывать, что в процессе эксплуатации агрегатов транспортных машин и механизмов в результате переменных гидродинамических, тепловых и скоростных нагрузок, а также постоянного изменения свойств самого НСМ под действием как внутренних, так и внешних факторов, например, загрязнение водой, дорожной пылью, топливом, охлаждающей жидкостью и т. д., наблюдается постепенное разрушение защитных слоев, требующее энергетических затрат на их восстановление. Решение этой проблемы, особенно при достижении предельных нагрузок, возможно путем комплексного модифицирования, как поверхности металла, так и смазочной среды. Наилучшего результата можно ожидать в случае, если модифицирование проводить как до начала, так и в процессе эксплуатации машин. Оно должно выполняться на всех этапах эксплуатации машин (обкатка, этапы нормального и повышенного изна-

шивания) и с таким расчетом, чтобы в процессе эксплуатации масла в результате внешних воздействий из него выделялись вещества, достраивающие кристаллическую решетку поверхностного слоя металла и/или упрочняющие его защитное покрытие. Эти мероприятия следует проводить не столько для предотвращения процессов окисления, сколько для интенсификации процессов восстановления металла. В равной мере это относится к металлу, смазочной среде и процессам на границе раздела фаз, т. е. в трибосистеме «агрегат-масло» в целом.

В настоящее время интенсивно развиваются нанотехнологии. Измельчение зерен поликристалла и уменьшение размерных пропорций металлических и керамических материалов увеличивает их предел текучести и сопротивление деформированию. Вторым ресурсом повышения прочности является переход от ординарных металлов и сплавов к материалам с высокой величиной межатомных связей. Типичным представителем последних являются интерметаллиды [21, 22], характеризующиеся металлической связью, и у которых сопротивление деформированию может расти с увеличением температуры. Использование покрытий состоящих из интерметаллидов с наноразмерными параметрами зерен является весьма перспективным направлением. Такое покрытие интенсивно защищает объемный материал благодаря высокой твердости, сопротивлению трения и износа и высокотемпературной стойкости. В наноструктурных состояниях интерметаллиды обладают уже при средних и низких температурах хорошей пластичностью и даже сверхпластичностью в условиях возросшей прочности, что позволяет значительно улучшить механические свойства материалов. Таким образом, создание наноинтерметаллидов в поверхностных слоях сопровождается мощным интерметаллидным упрочнением.

Формирование интерметаллидных структур в нанокристаллическом состоянии в поверхностных слоях материалов может быть успешно реализовано при воздействии на поверхность высокоинтенсивных пучков ионов металлов. Этим способом выявлены основные физико-химические и физико-механические закономерности формирования наноразмерных интерметаллидных фаз в поверхностных слоях металлов (Fe, Ni, Ti) при воздействии ускоренных пучков ионов металлов (Al или Ti).

Установлено, что режим высокоинтенсивной ионной имплантации позволяет внедрять легирующие элементы на глубины, многократно превосходящие величину пробега ионов в металлической матрице. Согласно данным электронной Оже-спектроскопии и резерфордовского обратного рассеивания, максимальная толщина ионно-легированного слоя составила 1000 нм для Ni-Al и Fe-Ni; 1600 нм — Ni-Ti и 2600 нм для Ti-Al систем. Максимальная концентрация внесенных легирующих элементов достигала 60...70 ат. %.

Показано, что ионная имплантация металлических образцов при высокоинтенсивных режимах позволяет формировать в поверхностных слоях мишени нанокристаллические фазы интерметаллидов со средним размером зерен 20...70 нм, равномерно распределенных по материалу, а также твердые растворы переменного по глубине состава, в состав которых входят нанокристаллические интерметаллидные фазы. На базе проведенного комплекса исследований физико-химических свойств имплантированных материалов были выявлены некоторые закономерности и различия в формировании ионно-легированных слоев никеля и титана в условиях высокоинтенсивной имплантации. При всех режимах, зафиксировано образование наноразмерных интерметаллидных фаз состава FeNi, Fe₃Al, NiAl и Ni₃Al для Ni-Al системы; TiAl и Ti₃Al для Ti-Al системы; TiNi и Ni₃Ti для Ni-Ti системы. Наряду с интерметаллидами, погруженными в твердый раствор, в системах формируются оксидные и карбидные фазы различных модификаций.

Важным для практических целей является обнаруженная связь между параметрами облучения (интенсивность ионного потока, энергия ионов, температура образцов, длительность обработки и др.), толщиной ионно-легированных слоев мишеней и средним размером зерен интерметаллидных фаз. Увеличение длительности обработки и соответственно дозы при постоянстве других параметров облучения титановых мишеней ионами алюминия приводит к пропорциональному росту толщины имплантированного слоя и среднего размера зерен формирующихся интерметаллидных фаз.

Формирование трехфазной зоны, содержащей интерметаллидные фазы (Ni₃Al и NiAl; Ti₃Al и TiAl; NiTi и Ni₃Ti) и твердый раствор, в области, наиболее приближенной к поверхности, обеспечивает чрезвычайно стабильный материал, устойчивый к коррозии и окислению.

Увеличение толщины указанной трехфазной области с наноразмерными фазами может способствовать значительному улучшению механических свойств материалов.

Испытания имплантированных образцов показали, что для всех модифицированных материалов микротвердость на глубинах до 2 мкм превышает таковую для исходных образцов. Например, для титана имплантированного с дозой $2,2 \cdot 10^{18}$ ион/см², наблюдается увеличение микротвердости в 1,5...3 раза в приповерхностной области толщиной ~1 мкм. Оценка упрочнения в соответствии с уравнением Холла-Петча, при измельчении зерна до 50...100 нм, согласуется с экспериментальными данными.

Имплантацию ионов можно рассматривать как один из способов защиты металлов от коррозии. Коррозия металлов, как известно, подразделяется высокотемпературную (химическую) и электрохи-

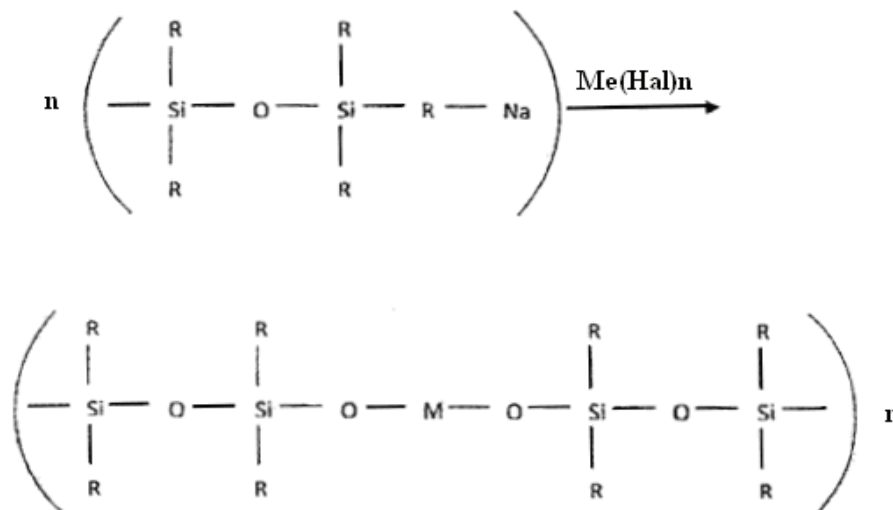
мическую (коррозию микрогальванических пар). С химической коррозией можно эффективно бороться, управляя структурно-механическими свойствами поверхностных слоев, направленно формируя в них микросплавы и интерметаллидные фазы. С электрохимической коррозией – коррозией микрогальванических пар можно бороться, создавая новые альтернативные микрогальванические пары катодного или анодного типа в соответствии с равновесно-неравновесным фактором.

Мероприятия типа «б» предусматривают модифицирование, активацию и переработку самого смазочного материала. Одним из основных требований, предъявляемым и эксплуатационным свойствам углеводородных смазочных материалов, является высокая устойчивость к окислению. Особенно актуальна эта проблема при повышенных температурах, когда скорость процессов окисления резко возрастает. Особенностью высокотемпературного окисления углеводородов [23, 24] является то, что уже на самых ранних стадиях образуются и накапливаются большое количество кислородсодержащих продуктов, причем не только моно-, но и би-, три- и более полифункциональные соединения с весьма ограниченной растворимостью в неполярных углеводородах. В [24] показано, что формирование в окисляемой среде обращенных мицеллярных агрегатов приводит к торможению окислительных процессов и, на наш взгляд, может рассматриваться как способ защиты от коррозии. Способность нефтяных смазочных материалов инициировать реакции поликонденсации полярных молекул ROOH в агрегаты с воспроизводством себе подобных структур в нано- и микроразмерном диапазоне является признаком самоорганизации систем, поддерживающих свое функциональное состояние. Введение подобных структур в НСМ в качестве присадок следует считать наиболее доступным путем ингибирования процессов высокотемпературной коррозии. В качестве таких соединений нами апробированы и рекомендуются к применению различные суперпластификаторы, особенно на карбоксилатной основе в сочетании с добавками наноуглерода, а также жидкие каучуки синтетического происхождения, либо органо-минеральные полимерные композиции.

С учетом вышеуказанного в настоящей работе предлагается механизм формирования защитных слоев на поверхности металла путем взаимодействия предварительно протравленной поверхности с модифицирующей присадкой, содержащей органосилоксаны, по следующей схеме:



В развернутом виде обменную реакцию формирования металлоорганосилоксанового защитного слоя (группировки) можно записать так:



Формирование метало-силоксановой группировки на поверхности металла способствует созданию защитных слоев повышенной устойчивости, т. к. при этом реализуются когезионные связи между одинаковыми атомами металлической матрицы и сервоитной пленки. Регулирование скорости и глубины протекающих процессов возможно путем физической активации границы раздела фаз электромагнитными полями и излучениями. При этом наибольший эффект достигается при комбинированной физико-химической обработке компонентов трибосистемы [25].

В качестве следующего примера реализации мероприятий на границе раздела фаз в работе на основе органофторполимеров предлагается формирование защитных пленок на поверхности металла заданной толщины и с определенным комплексом свойств, обеспечивающих замену трения между металлическими поверхностями на трение между полимерными покрытиями. Особенностью разработанных покрытий является способность к самовосстановлению после разрушения.

Еще одним способом управления свойствами на границе раздела фаз является создание на поверхности трибосопряжений предварительно подготовленного металла, в виде искусственных пористых слоев толщиной от 10 до 1000 нм, представляющих собой губчатые наноструктуры. Такие структуры, пропитанные смазочным материалом, обладают высокими демпфирующими свойствами, повышают эффективную площадь поверхностей скольжения и, как следствие, несущую способность тяжело нагруженных узлов трения.

Таким образом, эффективным путем решения проблемы кажущейся безызносности ТСАМ следует признать создание защитных трибологических покрытий (ЗТП) неравновесного типа. Одним из важнейших требований, предъявляемым к ним, можно считать выполнение (наряду с защитной функцией) функции высокотемпературной смазки. По сути дела речь идет об организации новой трибологической системы «ЗТП – смазка». Она представляет собой неравновесную систему, готовую к восприятию высоких переменных нагрузок. При синтезе таких систем в принципе могут быть учтены практически любые возможные сочетания внешних воздействий на ТСАМ. Важнейшим свойством таких систем является их способность к «самозалечиванию» микронеровностей, микротрещин, натиров и т. д., а также к самовосстановлению утраченных функциональных свойств отдельных элементов системы. Очевидно, что рассматриваемые системы «ЗТП – смазка» могут быть эффективны при решении проблемы водородного изнашивания.

Предложенные разработки частично запатентованы и апробированы авторами в реальных производственных условиях в крупных автотранспортных предприятиях Сибирского региона, а также активно внедряются в учебный процесс при подготовке специалистов специальности 190601 «Автомобили и автомобильное хозяйство» Томского государственного архитектурно-строительного университета [26].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синергетическая парадигма. Нелинейное мышление в науке и искусстве / под ред. В.А. Копчик. – М.: Прогресс-Традиция, 2002. – 436 с.
2. Минаев А.Н., Попов А.П., Деревцов Н.М. Химическая организация вещества в неорганических и биологических объектах // Известия МАИ ВШ. – 2001. – № 4 (18). – С. 118–127.
3. Саркисов Ю.С., Горленко Н.П., Семенова Г.Д. Информационные взаимодействия в системе «цемент-вода» // Техника и технология силикатов. – 2006. – № 1-2. – С. 9–16.
4. Полак А.Ф. Твердение мономинеральных вяжущих веществ. – М.: Высшая школа 1996. – 387 с.
5. Лесовик В.С., Строкова В.В. О развитии научного направления «Наносистемы в строительном материаловедении» // Строительные материалы. – 2006. – № 8. – С. 18–20.

6. Bornemann R., Fenling E. Ultrahochfester Beton // Eutwicklung und Verhalten. Leipziger Massivbauseminar. – 2000. – Bd. 10. – S. 1–15.
7. Химия привитых поверхностных соединений / под ред. Г.В. Лисичкина. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.
8. Панин В.Е., Гриняев Ю.В. Неустойчивость ламинарного течения и вихревой характер пластической деформации кристаллов // Известия вузов. Физика. – 1984. – № 1. – С. 11–21.
9. Жаворонков М.М., Нехорошее А.В., Гусев Б.В. и др. Свойства коллоидных систем генерировать низкочастотный переменный ток // Доклады АН СССР. – 1983. – Т. 270. – № 1. – С. 114–128.
10. Саркисов Ю.С., Аметов В.А. и др. Физико-химическая механика и процессы управления трибосистемами транспортных машин // Вестник машиностроения. – 2004. – № 1. – С. 25–29.
11. Панин В.Е., Лихачёв В.А., Гриняев Ю.В. Структурные уровни деформации твердых тел. – Новосибирск: Наука, 1985. – 229 с.
12. Князев Е.Н., Человек, конструирующий себя и свое будущее. Изд. 2-ое. – М.: КомКнига, 2007. – 232 с.
13. Аметов В.Л., Саркисов Ю.С., Спирин Е.Н. Влияние комбинированных воздействий на процессы в трибосопряжениях // Химия и технология топлив и масел. – 2004. – № 5. – С. 46–50.
14. Ахатов А.С. Молекулярная физика границ трения. – М.: Мир, 1963. – 321 с.
15. Костецкий Б.И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания // Трение и износ. – 1980. – Т. 1. – № 4. – С. 622–637.
16. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю.К. Машков, К.Н. Полещенко, С.Н. Порозовнюк, П.В. Орлов. – М.: Наука, 2000. – 280 с.
17. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский; Под ред. Д.Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
18. Солнцев С.С. Окситермосинтез высокотемпературных стекло-керамических покрытий // Техника и технология силикатов. – 2005. – Вып. 1–2. – С. 2–11.
19. Солнцев С.С. Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. – М.: Машиностроение, 1984. – 255 с.
20. Аппарат физико-химической переработки моторных масел в процессе их эксплуатации: пат. на ПМ 33164 Рос. Федерация. Оpubл. 10.10.2003. – Бюл. № 28.
21. Курзина И.А., Козлов Э.В., Шаркеев Ю.П. и др. Нанокристаллические интерметаллидные и нитридные структуры, формирующиеся при ионно-лучевом воздействии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2008. – 324 с.
22. Курзина И.А., Божко И.А., Калашников М.П. и др. Высокоинтенсивная имплантация ионов алюминия в титан // Металлофизика и новейшие технологии. – 2004. – Т. 26. – № 12. – С. 1645–1660.
23. Эмануэль Н.М., Зайков Г.Е., Майзус З.И. Роль среды в радикально-цепных реакциях окисления органических соединений. – М.: Наука, 1973. – 279 с.
24. Паренаго О.П., Кузьмина Г.Н., Балунин В.Н., Оганезова Э.Ю. Наноразмерные структуры в процессе высокотемпературного окисления углеводородных смазочных материалов // Российский химический журнал. – 2008. – № 4. – С. 142–149.
25. Соколов А.И., Тищенко Н.Т., Аметов В.А. Оценка работоспособности машин по параметрам работающего масла. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та. 1991. – 200 с.
26. Устройство для обработки смазочных масел: пат. на ПМ 30867 Рос. Федерация. Оpubл. 10.07.2003. – Бюл. № 19.

Поступила 10.02.2010 г.