УДК 621.891

Э.А. Ткаченко, Д.А. Кононов
Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск
т/ф (056) 374-82-17, E-mail: texmash@ua.fm

НАНОТЕХНОЛОГИЯ КОМПЕНСАЦИИ РАЗМЕРНОГО ИЗНОСА ПОДВИЖНЫХ СОПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН

Рассматриваются механизм и условия роста реновационных слоев в зоне подвижного сопряжения при использовании геомодификаторов, содержащих наночастицы кремния. Установлены достаточные и допустимые режимы диспергирования компонентов геомодификаторов, обеспечивающие компенсацию размерного износа элементов машин.
Ключевые слова: *геомодификатор, диспергирование, активация, наночастицы, реновация, компенсация износа.*

Введение. Исключительные свойства Si, основного компонента геомодификаторов (ГМ) на основе природного минерала серпентина, представляются перспективными в ряду современных спонтанно-восстановительных технологий размерного износа деталей подвижных сопряжений.

Аморфизация кремния в процессе измельчения и тонкого диспергирования в зоне трибоконтакта открывает новые для прецизионной техники технологические возможности формирования реновационных аморфных и наноструктурированных слоев на поверхностях пар подвижного сопряжения. Известно [1], что свободная энергия аморфного кремния (а-Si) больше соответствующей величины для кристалла (к-Si); $\Delta G_{а\text{-}к}$=0,12эВ. Следовательно, когда аморфный кремний находится в тесном контакте с кристаллическим кремнием или образованными на ювенильной поверхности тела пограничными слоями силицидов металлов, возникает термодинамическая движущая сила, вызывающая фазовый переход аморфный кремний – кристаллический кремний (а-к-переход). В идеальном варианте, если процесс происходит в системе аморфный кремний – монокристалл кремния, то он реализуется путем эпитаксиального роста. В реальных условиях для осуществления перехода а-Si → к-Si кроме термодинамического стимулирования, который справедлив для всех температур существования фаз, требуется обеспечение соответствующих кинетических условий. Чтобы обеспечить заметный рост одной фазы за счет другой, необходима достаточная подвижность атомов вблизи межфазной а-к границы. В системе сопряжения это достигается путем естественного нагрева зоны кратковременного и циклического взаимодействия до температуры Т ≥450°С, в результате чего реализуется термический твердофазный эпитаксиальный рост. Путем введения в систему дополнительной энергии механически возбужденных частиц кремния [2] происходит стимулирование твердофазного эпитаксиального роста и снижение температуры процесса Т<450°С. Особенностью системы сопряжения является образование аморфного слоя в зоне контакта тела с компонентами ГМ в результате разупорядочения поверхности к-Si при диспергировании частиц, содержащих кремний, до микро- и нано размеров. Возникающая в результате межфазная а-к-граница в момент диспергирования не свободна от загрязнений, так как сопутствующие компоненты серпентина (Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO) активируются и в зависимости от их процентного содержания в смеси

пассивируют ювенильную поверхность отдельных частиц кремния и образующегося слоя в целом. Источником этих загрязнений являются исходная среда зоны сопряжения и продукты механокрекинга всех ингредиентов ГМ. Если суммарная концентрация примесей превышает некоторую критическую величину, то твердофазный эпитаксиальный рост полностью блокируется и при увеличении температуры в объеме аморфной фазы происходит зарождение зерен кристаллической фазы и соответственно переход аморфный кремний – поликристаллический кремний. Экспериментально определены области реализации трех конкурирующих процессов: твердофазный эпитаксиальный рост, поликристаллический рост и плавление [1]. При быстром термическом воздействии результат сильно зависит от толщины аморфного слоя. При малых концентрациях легирующей примеси порядка 0,5-1 ат.%, например, углерода, кислорода и азота, значительно снижается скорость роста, а дальнейшее повышение концентрации может привести к полной остановке эпитаксиальной перекристаллизации. Обнаруживается также эффект компенсации, состоящей в том, что при легировании кремния элементами III и V групп в равных концентрациях происходит восстановление скорости твердофазного эпитаксиального роста до значений, характерных для нелегированного кремния [3]. Последнее значительно расширяет рецептурные возможности смеси нанопорошков ГМ в решении задач технологии восстановительных процессов размерного износа элементов машин.

Постановка задачи. Локальный трибоконтакт реализуется, как правило, за очень короткий промежуток времени и при высоких температурах на пятнах фактического контакта. Высокие температуры процессов в зоне подвижного контакта и связанные с этим большие скорости их протекания потребовали применения специальной методики in situ наблюдения за превращениями в изучаемых системах. Любой режим трибоконтакта является для заданной точки сопряжения импульсно-периодическим. Зависимость величины смещения межфазной а-к-границы от частоты локального температурно-силового воздействия предполагает переход между высокочастотным режимом температурных вспышек на пятнах фактического контакта и низкочастотным режимом – в случае аморфизации. Обнаружение частотного перехода свидетельствует о существовании характерного времени процесса, определяющего параметры термического и стимулированного роста. Данных по свойствам кристаллического кремния накоплено достаточно, что позволяет адекватно описать его поведение. Относительно свойств аморфного кремния и межфазной границы существующих экспериментальных сведений недостаточно для их однозначного описания имеющимися способами, особенно применительно к условиям подвижных сопряжений в технике. С этой целью целесообразно рассмотреть процессы, имеющие место в подвижном сопряжении, которые позволяют дать оценку возможного состояния и развития формирования реновационного слоя в условиях контактного сопряжения деталей машин с геомодификаторами.

Тонкое измельчение серпентина, перерабатываемого в виде сырья в технологическом процессе подготовки геомодификаторов комплексного состава, позволяет значительно ускорить процессы диспергирования и активации частиц ГМ в сопряжении, которые позволяют проводить процессы диффузионных и физико-химических взаимодействий при менее высоких температурах и давлениях. Скорость процессов в зоне контакта, проводимых с участием компонентов ГМ в твердом состоянии, пропорциональна величине общей поверхности их частиц и резко возрастает по мере диспергирования в зоне сопряжения тела и контртела. Субмикроскопическое измельчение частиц ГМ ведет к повышению однородности

смешивания и образованию пространственно-временной структуры коагуляционного типа в ротационном поле «третьего тела» системы сопряжения.

Характерным для прочности реальных частиц ГМ является масштабный фактор – увеличение прочности диспергируемых частиц с уменьшением размеров в области $10^{-1}…10^{-3}$мм. Масштабный фактор объясняет резкое повышение трудности измельчения при переходе к тонким фракциям частиц. Процесс грубого помола базируется в основном на развитии имеющихся дефектов структуры. При переходе к более мелким фракциям частиц дефекты в них становятся более редкими, а сами частицы более прочными. Практический предел тонкого измельчения – механического диспрегирования – составляет от 1 до 0,1 мкм. Дальнейшее измельчение должно сводиться к образованию новых дефектов в почти идеально прочных частицах и к их последующему развитию. В области техники, в которой основной задачей является ускорение химического взаимодействия компонентов ГМ в твердом состоянии друг с другом, а также с жидкой средой смазочного вещества, решение данной задачи возможно путем более тонкого измельчения. Степень измельчения компонентов ГМ определяется не просто средним размером частиц или обратной величиной удельной поверхности продукта, а полной картиной распределения частиц по их размерам.

Порошки, содержащие кремний, активированные ударным напряжением образуют главным образом частицы неправильной формы с острыми краями, тогда как порошки сопоставимой удельной поверхности, подвергнутые двойному ударному воздействию, состоят по преимуществу из округлых частиц со сравнительно гладкой поверхностью [2].

Вторичные частицы кварца, полученные путем ударных напряжений, имеют размер до 0,2 мкм, а при двойном ударном воздействии не более 0,01 мкм. Следует отметить решающую роль изменения первичной структуры для классификации взаимосвязей между структурной и реакционной способностью механически обработанного кварца. С ростом интенсивности и продолжительности механической обработки смеси порошков изменения первичной и вторичной структуры идут в одном и том же направлении, вторичная структура важна для поверхностных реакций, объясняющих механизм действия ГМ.

Следовательно, за короткий цикл нагружения-разгрузки в зоне сопряжения может реализоваться механическое диспергирование частиц ГМ до уровня оптимального взаимодействия с компонентами системы сопряжения без повреждаемости поверхностей подвижного контакта после стадии их приработки. Физическое объяснение этого явления требует экспериментального подтверждения влияния активированных наночастиц компонентов ГМ на реновацию поверхностей подвижного сопряжения и самоорганизацию компенсации их размерного износа.

Экспериментальные исследования. Эффект диспергирования в зоне локального контакта достигается при циклическом действии высокого гидростатического давления. Критерием применимости такого способа к различным материалам служит отношение предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение. Чем выше эта величина, тем эффективнее измельчается материал. При разработке схемы процесса диспергирования использован эффект локальной зоны распространения давления в сыпучей среде, согласно которому даже при гидростатическом давлении порядка ~ 500-600 МПа длина зоны распространения давления не превышает 3-4 величин зазора δ между контактирующими телами неконформного сопряжения.

Экспериментальные исследования влияния дисперсности и гранулометрического состава компонентов геомодификаторов при диспергировании смеси микропорошков в подвижных сопряжениях в процессе реновации поверхностей износа опор скольжения и качения проведены на испытательном стенде на базе измерительно-вычислительного комплекса КРОНВЕРКЕР 7607 (ИВК 7607). Применяется жидкий носитель смеси порошков геомодификаторов в зону сопряжения. В качестве диагностических параметров используются переходное омическое сопротивление дисперснонаполненного масляного слоя, токовые сигналы мгновенных значений температуры и амплитудно-частотный спектр вибрации элементов пары сопряжения. Трибомониторинг включает непрерывный контроль момента трения, частоты вращения и состояния фрикционно-износных характеристик деталей узлов трения. Диапазон изменения выходного сигнала измерения сопротивления – 0…2МОм, погрешность измерения ± 2%. Сужение диапазона измерения производится в зависимости от состояния подшипникового узла и консистенции смазки.

Подшипник скольжения. Антифрикционный чугун АЧС-1 и бронза Бр. АЖ9-4 по гладко обработанной закаленной шейке стального вала: $pv \le 15$ кгм/см^2·с и $pv = 75 \div 100$ кгм/см^2·с соответственно. Смазка без принудительного давления. Конструктивные размеры бронзового и чугунного вкладышей: $d=35 \div 60$ мм; $\ell/d=0{,}5 \div 1{,}5$; толщина стенки h=5мм. Положительная разность между диаметром вала и вкладышем подшипника скольжения без смещения осей относительного движения определяет предельный исходный размер частиц компонентов геомодификаторов, обеспечивающих свободное перемещение частиц в смазке в процессе диспергирования. Величина зазора задается режимом диспергирования на стадии приработки, концентрацией геомодификатора в смазке и гранулометрическим составом смеси порошков. При смещении осей пары сопряжения условия гидродинамического режима нарушаются и возникает циклический режим нагружения – разгрузки в локальной зоне взаимодействия диспергируемых частиц с поверхностями контакта. В данных условиях допустимый исходный размер частиц диспергирования увеличивается, но возникает опасность повреждения поверхностей контакта. Значения величины дисперсности частиц в период первичной структуризации определяются минимальной составляющей амплитуды колебания зазора поверхностей сопряжения.

Подшипник качения. Используются шариковые радиальные однорядные подшипники с уплотнением серии 180200, 180204 и 180208 и классом точности 0, 6 и 5. Исходная точность вращения подшипников задается радиальным биением дорожек качения внутреннего и наружного колец. Тарировка точности вращения каждого подшипника проводилась на ИВК 7607 и сравнивалась с исходными данными предельных отклонений диаметров колец подшипников качения. Смазка консистентная Литол 24 и минеральное масло МС-20. Суммарная концентрация компонентов геомодификаторов варьировалась в диапазоне 6-12% от объема смазки.

Интерфейс RS 232 и RS 485, посредством программного обеспечения пользователя на базе протокола обмена MODBUS.RTU, позволил:

- выводить на монитор персонального компьютера информацию о текущих измерениях параметров динамических процессов, происходящих в зоне диспергирования и содержание часовых архивов;
- на базе часовых архивов создавать параметры пороговых значений и сравнивать их с эталонными величинами;
- калибровать каналы измерения для конкретных условий и исходных параметров диспергирования компонентов геомодификаторов;

- организовать сеть приборов для создания избыточности дополнительных средств и возможности сверх минимально необходимых при оценке достоверности получаемых данных;
- создавать графический вариант значений обработанной информации.

ИВК 7607 производит архивацию усредненного за секунду значения переходного сопротивления. Токосъем производится с вала узла сопряжения путем присоединения щеточного механизма. При мгновенных показаниях переходного сопротивления порядка 80-100% установленного диапазона архивные показания составляют 40-80%.

Эталонирование аморфизации компонентов геомодификаторов выполнено для: Al_2O_3 – электрокорунд белый марки ЭБ9 исходной зернистостью 10 мкм; SiO_2 – кварц зернистостью 10 мкм; Fe_2O_3 – шпинель (γ - Fe_2O_3) зернистостью 10 мкм. Аморфная фаза оценивалась по методу дифференциального термического анализа (ДТА) и концентрации парамагнитных центров по спектрам ЭПР. Пороговые значения эталонных данных введены в базу «Эталон» персонального компьютера. Совместное измерение нескольких неоднородных величин компонентов геомодификаторов определяет аддитивную аморфную и нанокристаллическую составляющие по известной регрессионной зависимости в функции времени диспергирования.

Анализ результатов. Результаты экспериментальных исследований диспергирования компонентов порошковой смеси геомодификаторов приведены в табл.1. Для каждого компонента ГМ при определенном давлении существует граница диспергирования. При ее превышении начинается обратный процесс – агрегатирование или спрессовывание субмикроскопических частиц. Чем выше предел прочности частицы σ_B, тем выше граница измельчения. При давлении выше граничного, при наличии смазочного материала в «третьем теле», образуются довольно плотные, но сравнительно малопрочные скопления из частиц компонентов ГМ. Каркас получаемых агрегатов составляют более твердые и более крупные частицы, промежутки между которыми заполнены более мелкими фракциями частиц различного состава. При субмикроскопической дисперсности компонентов ГМ давление поверхностью тел сопряжения воспринимается через псевдоэластичную незамкнутую оболочку всей поверхностью измельчаемого материала. При каждом цикле «повышение-сброс давления», действующего на локальный объем компонентов ГМ в зоне сопряжения, образуется переходной квазистабильный слой, прилегающая часть которого взаимодействует с поверхностью по физико-химическому механизму взаимодействия твердых тел. Максимально достижимая дисперсность порошка компонентов ГМ, пропорциональная энергонапряженности зоны сопряжения, достигает величины ~ 2,5нм (рис.1).

При двойном ударном воздействии обкатыванием достигается 90% аморфизация кварца, а размеры кристаллов при этом не превышают 10 нм [4, 6]. Различные методы оценки степени аморфности дают согласующиеся результаты. Искаженная решетка появляется в кристаллах, склонных к пластической деформации, поэтому исключается быстрое накопление таких искажений в к-Si с его хрупко-упругими свойствами. Видоизмененная структура механически активированного к-Si, представленная в виде аморфизированной части или аморфной фазы материала определяет его реакционную способность (рис.1).

«Частично упорядоченная фаза» выражает сходство и различие между к-Si и аморфными фазами диоксида кремния. Структура и распределение аморфной фазы определяется типом механической обработки, а количество образовавшейся аморфной

фазы зависит от интенсивности и продолжительности обработки. Толщина аморфного слоя варьируется от 150 до 2нм, но чаще составляет 20-30нм.

Таблица 1. Структуризация компонентов геомодификаторов в зоне подвижного сопряжения

основные компоненты геомодификаторов	структуризация					
	первичная			вторичная		
	Коэф. измельчения, К	дисперсность, мкм	давление агрегатирования, МПа	время установившегося диспергирования, час	дисперсность остаточных кристаллов, нм	аморфизация, %
Al_2O_3	1,3	2-3	200	15	20-30	80-85
SiO_2	1,5	10	150	20	15-20	90
Fe_2O_3	1,4	10-12	130	17	-	-
MgO	2,0	50	100	-	-	-
CaO	3,5	70	50	-	-	-

Примечание: $K=P_{гид.ст} / \sigma_B$ – коэффициент измельчения, обеспечивающий минимальный размер частиц материала с прочностью на растяжение σ_B; $P_{гид.ст}$ – гидростатическое давление в зоне сопряжения.

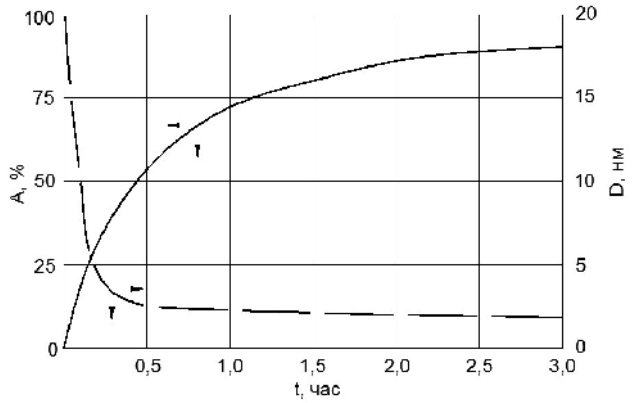

Рис.1. Зависимость аморфной части A и размеров остаточных нанокристаллов D от продолжительности диспергирования кварца обкатыванием шариками подшипника качения 180204. Смазка консистентная Литол 24. Частота вращения вала $5c^{-1}$. Исходный размер диспергируемых частиц 10 мкм

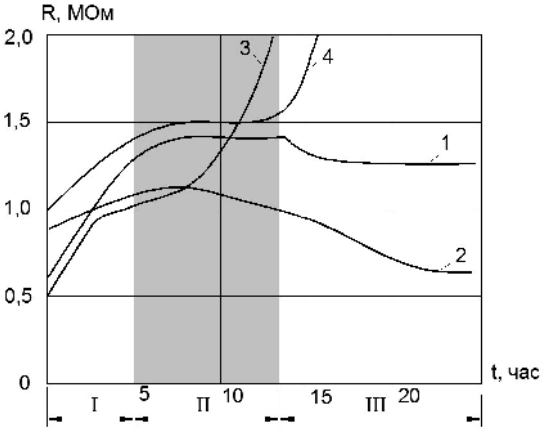

Рис.2. Структуризация компонентов геомодификаторов (1- Al_2O_3; 2- Fe_2O_3; 3- SiO_2) и смеси порошков ГМ (4- Al_2O_3-2,3%; Fe_2O_3 – 2,2%; SiO_2 – 6,5%) в объеме смазки МС-20 в процессе реновации поверхностей сопряжения подшипника скольжения (I – период приработки и первичной структуризации; II – аморфизация компонентов геомодификаторов; III – реновация поверхностей сопряжения)

В процессе диспергирования кварца по плоскостям скола рвутся связи Si – O. Предполагаются возможными гомолитические и гетеролитические расщепления. Из двух типов фрагментов $\overset{\cdot}{\equiv}$ Si • и $\overset{\cdot}{\equiv}$ SiO •, ожидаемых при гомолитическом разрыве,

радикалы первого типа обнаруживаются по спектрам ЭПР после механической обработки в атмосфере инертного газа или H_2 в виде парамагнитных центров E´. Концентрация парамагнитных центров возрастает так же, как доля аморфной фазы. Постепенное растворение аморфного слоя и вскрытие кристаллической фазы служит индикатором наличия аморфного слоя, так как парамагнитные центры локализованы именно в этом слое.

При сравнении энергии разорванных связей Si-O, оцениваемой исходя из их максимальной концентрации 0,1%, с энергией, измеряемой методом дифференциального термического анализа в ходе рекомбинации, последняя на 2 порядка больше расчетной величины. В системе идут процессы, сопровождаемые выделением энергии, связанные с упорядочением аморфной фазы, что подтверждено результатами люминисценции кварца после механического воздействия. При механическом диспергировании возникают новая поверхность и аморфная фаза, причем это связано с разрывом связей Si-O. В результате энергосодержание твердых частиц компонентов ГМ возрастает.

Структурные дефекты, главным образом, в виде аморфной фазы, образование которой сопряжено с возрастанием избыточной свободной энтальпии, приводит к возрастанию реакционной способности SiO_2. Механически обработанный SiO_2 обнаруживает такую же химическую активность, как и аморфные типы диоксида кремния. Однако в аморфных фазах SiO_2 отсутствует градиент структурной упорядоченности по направлению от поверхности частицы к внутренним слоям. Чем меньше доля аморфной фазы, тем больше механически обработанный SiO_2 по структуре и химической активности, похож на необработанный.

Из рис.2 следует, что в начале процесса приработки поверхностей скольжения для всех компонентов и смеси порошков геомодификатора омическое сопротивление поддерживается на достаточно низком уровне и определяется сопротивлением ненаполненного масляного слоя. В процессе диспергирования частиц наполнителя смазки омическое сопротивление повышается и устойчиво в диапазоне аморфизации основных компонентов геомодификаторов трения. Существенное отличие в поведении SiO_2 и Al_2O_3 подтверждает выводы, полученные в работе [7]. Аморфизированная часть SiO_2 расходуется на формирование реновационного слоя, который проявляет себя не только как антифрикционный, но и как барьерный по электропроводности слой. Резкое возрастание омического сопротивления масляного клина свидетельствует о спонтанном образовании силицидного слоя, который по классификации электропроводности материалов является полупроводником. В механике порошки относят к сыпучим средам, тогда как материалам характерна устойчивость (сохранение) формы. Следовательно, преобразование активированных нанопорошков в слоистые покрытия можно отнести к механохимической нанотехнологии восстановления размерного износа подвижных поверхностей сопряжения. Многие авторы отмечают, что наноматериалы как материалы с характерным размером внутренней структуры, измеряемым в нанометрах, не представляют собой нечто новое для науки [5]. Однако понимание, что отдельные образования окисей, металлов, керамики и других веществ есть наноматериалы, формирует совершенно новое направление в технологии машиностроения, базирующееся на самоорганизации допусков на размер на стадии приработки и компенсации размерного износа элементов подвижных сопряжений в процессе эксплуатации без остановки машин и механизмов.

Стабильность омического сопротивления Al_2O_3 в составе смазочной композиции приводит к выводу о дезактивации наночастиц, которые в приработанных

трибосопряжениях выполняют функцию нанокерамической смазки. Аморфизированная часть Al_2O_3 по предположению выступает в качестве катализатора трибохимических реакций в трибосопряжении. При отсутствии дополнительных реагентов не исключается формирование нанослоя высокой электропроводности, что подтверждается ступенчатым снижением омического сопротивления в период реновации поверхности. Однако в смеси порошков геомодификаторов такое развитие механохимических реакций блокируется взаимодействием с компонентами, содержащими железо, образующими интерметаллидные соединения. Последние при достижении частицами наноразмеров выступают в роли микро- и нанокерамических безактивационных компонентов смазки.

Поведение частиц Fe_2O_3 описывается моделью дисперсных наполнителей, когда появление мелких примесей диспергированных частиц и продуктов разрушения прирабатываемых поверхностей сопряжения снижают омическое сопротивление, так как металлические частицы периодически создают электрический контакт между поверхностями трения. В случае избыточности компоненты Fe_2O_3, как отмечалось выше, возможно образование интерметаллидных соединений с продуктами разделения диспергируемых частиц Al_2O_3. Конкурирующие процессы в реакционной смеси порошков геомодификаторов нивелируют отдельные проявления, характерные для их компонентов в изолированной среде. Несмотря на аддитивный вклад каждой из составляющей диспергированной смеси порошков в подвижном сопряжении, превалирующее влияние на формирование силицидных реновационных слоев (рис.3) оказывает a-Si. При этом реакционно-активная фаза a-Si образует слои вторичных структур на поверхностях сопряже-ния пары трения, снижая свою концентрацию в смазочном слое. В конечном счете эти процессы при-водят к резкому повышению оми-ческого сопротивления границы раздела тел трибоконтакта. Послед-нее диагностируется как начало развития процесса реновации повер-хностей сопряжения. Скорость про-текания процессов диспергирования и аморфизации, а следовательно и реновации поверхностей, на порядок выше при обкатывании компонентов геомодификаторов в смазке по схеме подшипника качения (рис.1). Многоцикловая нагрузка зоны контакта шариков подшипника качения с реакционной смесью порошков геомодификаторов приводит к появлению a-Si (порядка 25%) уже на 10 мин процесса приработки. Это снижает вибрацию за счет уменьшения зазоров в системе сопряжения беговых дорожек колец и шариков подшипника, а также снижает работу трения качения и износ ресурсоопределяющих элементов подшипника. Основные закономерности структуризации компонентов геомодификаторов в сопряжении качения аналогичны сопряжению скольжения (рис.2). Однако высокая скорость протекания динамических процессов в зоне контакта при обкатывании значительно сужает диапазон регистрации выходных параметров, в том

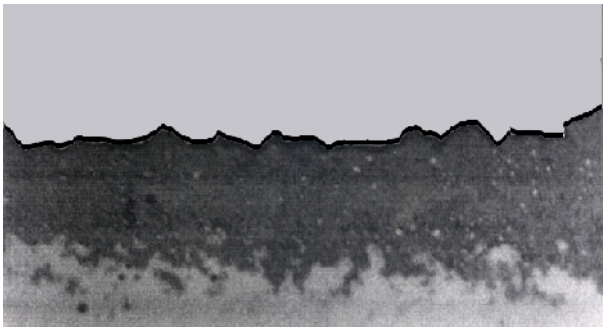

Рис. 3. Слоистая структура реновационного слоя с антифрикционным покрытием a-Si_{1-x}-C_x сформированных по техноло-гии восстановления размерного износа деталей в сопряжении

числе и омическое сопротивление дисперснонаполненного компонентами геомодификаторов слоя смазки.

Заключение. Повышенная реакционная способность механически обработанного SiO_2 проявляется в том, что он по сравнению с необработанным материалом обеспечивает реализацию твердофазного роста и спекание при более низкой температуре или в случае одинаковых температур с существенно более высокой скоростью. Изменение поведения основных компонентов геомодификаторов активированных диспергированием до наноразмеров объясняется образованием аморфной фазы. Реакции SiO_2 с твердыми веществами Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO и CaO, которые идут непосредственно в процессе измельчения серпентина или при последующем диспергировании и нагреве смеси порошков ГМ в подвижном сопряжении, определяют феномен геомодификаторов в формировании реновационных слоев в восстановительной технологии размерного износа поверхностей сопряжения.

Список литературы:

1. Вяткин А.Ф. Твердофазный эпитаксиальный рост кремния // Поверхность. Физика, химия, механика.-1991, №4.- С.5-26.

2. Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир, 1987.- 584 с.

3. Suni I., Goltz G., Grimaldi M.G., Nikolet M.A.// Appl. Phys. Lett. 1982, V.40.- P.269.

4. Chen Y., Fitzgerald J., Chadderton L.T., Chaffron L.J. Of Metastable and Nanocrystalline Materials.- 1999. -2, №6.-P.375-380.

5. Гузь А.Н. Введение в механику нанокомпозитов / А.Н. Гузь, Я.Я. Рушицкий, И.А. Гузь.- К.: Институт механики им. С.П. Тимошенко, 2001.-398с.

6. Ткаченко Э.А. Трибохимические аспекты геомодификаторов трения. Материалы междунар. научн.-техн. конф. «Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкции». Севастороль, 2011.- С.48-53.

7. Ткаченко Э.А. Формирование слоев вторичных структур из среды активированных компонентов геомодификаторов. Материалы междунар. научн.-техн. конф. «Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкции». Севастороль, 2011.- С.42-47.

Надійшла до редколегії 29.05.2012 р.

Е.А. Ткаченко, Д.О. Кононов

НАНОТЕХНОЛОГІЯ КОМПЕНСАЦІЇ РОЗМІРНОГО ЗНОСУ РУХОМИХ ПОВЕРХОНЬ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН

Розглянуті механізм і умови росту реноваційних шарів в зоні рухомого спряження з використанням геомодифікаторів, які містять наночастини кремнію. Встановлені достатні та допустимі режими диспергування компонентів геомодифікаторів, які забезпечують компенсацію розмірного зносу елементів машин.

***Ключові слова**: геомодифікатор, диспергування, активація, наночастини, реновація, компенсація зносу.*

E. Tkachenko, D. Kononov

NANOTECHNOLOGY OF INDEMNIFICATION OF SIZE WEAR OF MOVABLE INTERFACES OF ELEMENTS OF MACHINES

A mechanism and terms of height of renovation layers are examined in the zone of movable interface at the use of geomodificators containing nanoparticles of silicon. The sufficient and possible modes of dispergating of components of geomodificators providing indemnification of size wear of elements of machines are set.

***Keywords**: geomodificator, dispergating, activating, nanoparticles, renovation, indemnification of wear.*