

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 531.43:621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).250-265](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).250-265)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., **А.Є. Чернай**, асп., **В.В. Слонь**, здобувач, **А.П. Лукашук**, асп.

*Центральноукраїнський національний технічний університет
e-mail: AulinVV@gmail.com*

Вплив процесів, що відбуваються в рухомих спряженнях деталей транспортних машин під дією компонентів геомодифікатора, на ефективність триботехнологій припрацювання і відновлення

Показано, що ефективність реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення систем і агрегатів транспортних машин залежить від підготовки робочого середовища в якому відбувається припрацювання трибоспрямих деталей. Розглянуто властивості основних компонентів геомодифікатора КГМТ-1: SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Обґрунтована їх активізація при подрібненні та подачі в зону тертя, реалізацію станів і процесів самоорганізації. З'ясовано умови формування захисних покриттів на робочих поверхнях деталей. Виявлено, що для матеріалів компонентів геомодифікатора КГМТ-1 з сильно гомеополлярними зв'язками, таких як SiO_2 , SiC та алюмосилікатний мінерал каолінит, спостерігається процес аморфізації, фазового перетворення $\alpha\text{-Si-k-Si}$. Показано як фізичні процеси обумовлюють протікання трибохімічних реакцій і формування захисних покриттів.
механічна активація, диспергування частинок, геомодифікатор тертя, спряження деталей, мастильне середовище, трибохімічні реакції

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр, **А.Є. Чернай**, асп., **В.В. Слонь**, соискатель, **А.П. Лукашук**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

Влияние процессов, происходящих в подвижных сопряжениях деталей транспортных машин под действием компонентов геомодификатора, на эффективность триботехнологий приработки и восстановления

Показано, что эффективность реализации триботехнологий приработки и восстановления систем и агрегатов транспортных машин зависит от подготовки рабочей среды в котором происходит приработка трибоспрямих деталей. Рассмотрены свойства основных компонентов геомодификатора КГМТ-1: SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Обоснован их активизация при измельчении и подачи в зону трения, реализацию состояний и процессов самоорганизации. Выявлены условия формирования защитных покрытий на рабочих поверхностях деталей. Виявлено, что для материалов компонентов геомодифікатора КГМТ-1 с сильно гомеополлярными связями, таких как SiO_2 , SiC и алюмосилікатний мінерал каолінит, наблюдается процесс аморфизации, фазового превращения $\alpha\text{-Si-k-Si}$. Показано как физические процессы обуславливают протекание трибохимических реакций и формирования защитных покрытий.

механическая активация, диспергирование частиц, геомодификаторы трения, сопряжения деталей, смазочное среду, трибохимические реакции

Постановка проблеми. Рухомі спряження деталей систем і агрегатів транспортних машин знаходиться поблизу стану рівноваги, якщо відсутня когерентність матеріалів їх поверхневих шарів у трибоконтках [1]. При введенні в

зону трибоспряження суміші порошків геомодифікаторів тертя така система набуває неупорядкованої поведінки. При цьому великі частинки геомодифікаторів можуть утворювати когерентні і некогерентні фазові границі з матеріалами поверхонь деталей в залежності від міри відмінності фаз за структурою і усталеністю кристалічної ґратки. Когерентні фази можуть посилювати, або послабляти фазові границі частинок компонентів геомодифікаторів з поверхнями трибоспряження деталей. Для функціонування такої системи характерними є окремі елементи самоорганізації, які мають істотний керуючий вплив на протікаючі процеси і ефективність триботехнічного припрацювання і відновлення спряжень деталей. Важливим є взаємодії між частинками компонент геомодифікаторів і їх взаємодія з робочою поверхнею деталей систем і агрегатів транспортних машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання геомодифікаторів в мастильних матеріалах в зазорі трибоспряжень деталей сприяє формуванню рівноважної шорсткості їх робочих поверхонь під дією диспергівних та активуючих компонентів. При цьому рівноважна шорсткість прискорює досягнення сталої мікрогеометрії поверхні, що відтворюється в процесі тертя [2].

При визначенні особливостей структурнофазових перетворювань матеріалів при терті [3, 4] та закономірностей зношування робочих поверхонь деталей трибоспряжень доцільним є використання фізичної мезомеханіки зношування [5-7]. Трибофізико-матеріалознавчий підхід дає можливість оцінити ресурс спряжень деталей [8], виявити зміни триботехнічних характеристик та фізичних процесів в матеріалах [9]. При з'ясуванні сутності процесу припрацювання спряжень деталей [10] важливими є трибологічні переходи [11] і можливості триботехнологій припрацювання [12] та відновлення [9].

В роботі [13] розглядаються триботехнології припрацювання і відновлення на етапах життєвого циклу транспортних машин, але необхідно враховувати режими мащення [14, 15] та вплив наночастинок присадки на фізико-механічні властивості поверхні тертя [16]. Визначено, що триботехнології припрацювання і відновлення потребують системно-спрямованого [17] та синергетичного [18, 19] підходу до їх удосконалення щоб належним чином підвищити зносостійкість і рівень надійності й, по можливості, створити smart-покриття в зеленій трибології [20]. В триботехнологіях відновлення важливим є застосування багатокомпонентних присадок в мастильні матеріали, передусім це геомодифікатор тертя [21-24] та механізм формування композиційної оливи [25-27], який на сьогодні остаточно не виявлено.

Зносостійкість і надійність деталей транспортних машин залежить передусім від процесів взаємодії компонентів геомодифікаторів з оливою та їх робочими поверхнями [28, 29]. Разом з тим для оптимального керування режимами функціонування трибоспряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин ще недостатньо розглянуто вплив компонентів комплексних присадок на поверхню тертя [30].

В процесі диспергування можливе спостереження укрупнених частинок компонентів геомодифікаторів у вигляді молекулярно-щільних агрегатів [31]. В роботі [32] формування частинок суміші не залежить від вихідної величини питомої поверхні і гранулометричного складу присадки. В той час в залежності від інтенсивності підведеної механічної енергії в процесі подрібнення частинок твердих компонентів геомодифікаторів відбувається зміна механізму їх дефектоутворення при переході від крихкого руйнування до стадії пластичного плину.

Умови навантаження, вплив мастильного середовища і матеріалів локального контакту з реалізацією процесів і стану самоорганізації змінюють швидкість зростання ентропії, віддаляючи або наближаючи момент руйнування частинок порошкової суміші

геомодифікатора, реалізуючи трибохімічні реакції з утворенням ювенільних поверхонь трибоспрямижень деталей [33].

Щоб підготувати порошкові суміші геомодифікатора до додавання їх в мастильне середовище і сформувати умови реалізації трибохімічних реакцій необхідно:

– подрібнити компоненти суміші, попередньо за допомогою подрібнювачів, або здійснити подрібнення в зоні тертя деталей;

– забезпечити ефективне змішування компонентів для отримання максимального числа контактів частинок й формування композиційного мастильного середовища [27];

– в зоні контакту частинок створити умови для забезпечення взаємної дифузії атомів або іонів компонентів, сприяти утворенню твердого розчину та виділення на поверхнях тертя кінцевого продукту трибохімічної реакції [30].

При терті поверхневі шари спряжених деталей піддаються сильному впливу мастильного середовища, в якому вони працюють при одночасному збуренні матеріалів трибосистем [34]. Врахування фізико-хімічних та механічних факторів процесів руйнування поверхневих шарів трибоспрямижень деталей дає підстави розглядати процес зношування, як кумулятивний, який підсумовує дії окремих факторів у процесі багаторазового повторюваного навантаження фрикційних зв'язків з відділенням частинок зносу з робочої поверхні деталі [34, 35].

Механічна активація частинок компонентів геомодифікатора в процесі подрібнення і механохімії в трибоспрямиженнях деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення базується на двох основних принципах: імпульсний характер процесу виникнення поля механічних напружень та його релаксація; локальний характер механічного впливу на частинки порошкової суміші геомодифікатора в контактi між собою та з робочими поверхнями деталей спряження. Важливим при цьому є утворення ділатонно-компресонних локальних областей [36], в яких виникають поле механічних напружень і канали їх релаксації. Тривалість та форми існування поля напружень при реалізації самоорганізації процесів в трибоспрямиженнях деталей з композиційним мастильним середовищем та формуванням захисних покриттів на прикладі геомодифікатора КГМТ-1, слід враховувати при створенні і удосконаленні триботехнічного припрацювання і відновлення, але це потребує теоретичного обґрунтування та експериментального підтвердження.

Постановка завдання. Метою роботи є з'ясування впливу процесів, що протікають в трибоспрямиженнях деталей транспортних засобів при диспергуванні та активуванні частинок компонентів геомодифікатора КГМТ-1, на формування захисних ювенільних покриттів на робочих поверхнях деталей та ефективність підвищення зносостійкості і надійності спряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин створеними триботехнологіями припрацювання та відновлення.

Виклад основного матеріалу. Ефективність реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення спряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин передусім залежить від підготовки робочого середовища (композиційні оливи, електроліти), які активізують суміші компоненти функціональна присадка. Традиційні технології подрібнення порошкових сумішей функціональних присадок, засновані на процесах роздавлювання, розколювання та ударяння та ін.. Разом з тим вони не задовольняють сучасним вимогам за ступенем диспергування частинок геомодифікаторів. Зазначимо, що достатнім ступенем вважається таке подрібнення, коли після введення в зону спряження частинки можуть взаємодіяти між собою і робочими поверхнями деталей на дифузійному і фізико-хімічному рівнях без їх пошкодження. В той час диспергування частинок геомодифікаторів тонкого помолу і субмікроскопічних розмірів та їх взаємодія між собою, з мастильним середовищем і

робочими поверхнями рухомих спряжень деталей недостатньо досліджено. Особливо це стосується механізмів і умов диспергування компонентів мінеральної сировини, з якої виготовляється геомодифікатор КГМТ-1.

Механічне подрібнення і активація твердих частинок геомодифікатора у дробарних апаратах в технологічному відношенні є традиційним прийомом, який дозволяє реалізувати імпульсне підведення механічної енергії до оброблюваних частинок порошкових сумішей. Підведення механічної енергії до порошкової суміші геомодифікатора при підготовці основи присадки забезпечується завдяки конструктивно-технологічних рішень промислових дробарних пристроїв [33]. При безпосередньому поданні в трибоспряження деталей це реалізується на плямах фактичного контакту поверхонь трибоспряжень деталей.

В основі механічного подрібнення частинок геомодифікатора, їх активації та участі у трибохімічних реакціях лежать фізичні явища, які виникають при впливі на матеріали діючих високих тисків зі зсувом. В результаті протікання фізичних явищ утворюються структурні і хімічні дефектів в об'ємі і на поверхнях матеріалів частинок геомодифікаторів, у поверхневих шарах матеріалів спряжених зразків і деталей. Зазначимо, що ці процеси принципово відрізняються від процесів подрібнення на підготовчій стадії й отримання геомодифікаторів з мінеральної сировини, в яких основну роль відіграють утворення нових поверхонь, а також розміри частинок компонентів. На стадії збагачення і поділу компонентів геомодифікатора, як мінеральної сировини, взятих окремо, слід використовувати методи попередньої переробки частинок для забезпечення оптимальних умов введення їх в зону трибоконтракту деталей і отримати на стадії синтезу нові функціональні наноструктуровані матеріали та зносостійкі покриття на робочих поверхнях деталей у середовищі композиційної оливи.

Визначено, якщо частинки порошкової багатокомпонентної суміші геомодифікатора, що піддаються механічній обробці однофазні, то релаксація механічних напружень супроводжується наступними процесами: утворенням нової поверхні; появою дефектів у кристалах і метастабільних форм; аморфізацією твердої речовини частинок та хімічними перетвореннями. Питома вага реалізації процесів залежить від:

- умов трибомеханічного навантаження: конструкції трибоспряження деталей, інтенсивності підведення механічної енергії, швидкості навантаження і розвантаження зони трибоконтракту;

- комплексу фізико-механічних властивостей частинок компонентів геомодифікатора;

- температури трибомеханічного впливу.

Спостереження за полем механічних напружень свідчить, що характер їх релаксації може змінюватися в процесі активації частинок компонентів геомодифікатора. Збільшення швидкості розвитку магістральних тріщин при руйнуванні кристалів частинок компонентів супроводжується зміною механізму руйнування поблизу джерела тріщини. Змінюються також розміри частинок геомодифікатора у відповідності до переходу процесу від крихкого подрібнення до їх пластичної деформації. Зазначимо, що позитивною ефективністю процесу подрібнення є отримання максимальної площі поверхні частинок при мінімальних витратах механічної енергії, а процесу активації – накопичення енергії у вигляді дефектів або інших змін у матеріалах частинок геомодифікатора та матеріалах спряжень деталей. При цьому наявна можливість зниження енергії активації хімічного перетворення або поліпшення умов для протікання процесів, особливо це стосується впливу просторової

орієнтації і об'єму молекул на хід трибохімічних реакцій.

Виявлено, що при розробці триботехнологій припрацювання і відновлення та їх удосконалення слід врахувати реальність ситуацій, коли час механічного впливу та формування поля напружень і їх релаксацій в трибохімічному процесі більше тривалості протікання самої хімічної реакції і процесу механічної активації. Зазначимо, якщо час механічного впливу та формування поля напружень менше часу хімічної реакції, то це свідчить про розділеність цих процесів в часі. Кінетика процесів в зоні тертя трибоспряжень деталей з геомодифікатором залежить від зміни розмірів і форми його частинок, компонентів геомодифікатора, питомої площі утвореної поверхні, спонтанно утворених комплексів й обумовлює формування вторинних структур матеріалу компонентів.

Для реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення після попередньої механічної обробки подрібненням частинки геомодифікатора, вони вводяться в зону спряження деталей з певною затримкою в часі, оскільки враховується поділ у часі стадій силового впливу та трибохімічного процесу, який призводить до високочуджених станів матеріалів частинок, які вже встигають до цього моменту релаксувати і не можуть брати участь в ініціюванні трибохімічних реакцій. Успадкованість ознак матеріалів компонентів геомодифікатора, спостерігали на стадіях їх підготовки і формування композиційних олів. Зазначимо, що при розробці триботехнологій відновлення, найчастіше виключають з розгляду механоактивації реагентів на стадії трибохімічних реакцій у трибоспряженні деталей.

Якщо реалізується тонке подрібнення геомодифікатора, то у технологічному процесі підготовки його комплексного складу, можливо значно прискорити субмікроскопічне диспергування і активацію функціональних частинок компонентів в трибоспряженні деталей, які сприяють реалізації фізико-хімічних взаємодій в зоні контакту. Швидкість протікання процесів у зоні контакту визначається взаємодією частинок, що вступають в трибохімічну реакцію. При цьому враховуються число і площа локальних контактів частинок між собою з робочими поверхнями спряжених деталей, які визначають швидкість протікання трибохімічної реакції. Передусім це стосується початкової стадії процесу трибоконтрактування. Субмікроскопічне диспергування частинок геомодифікатора приводить до підвищення однорідності змішування та утворення просторово-часової структури коагуляційного типу в ротаційному полі композиційного мастильного матеріалу в трибоспряженні деталей, яка інтенсифікується частотою його пружної хвилі.

Показано, що для забезпечення тонкого помолу геомодифікатора практичне значення відіграє явище втоми матеріалу частинок його компонентів, зниження статичної і динамічної міцності частинок в момент періодичних навантажень і розвантажень зони локального контакту з достатньо високою частотою. Разом з тим імпульсний механічний вплив підвищує втомлюваність матеріалу частинок геомодифікатора і відповідно зменшує міцність їх структури. При цьому прискорюється руйнування, оскільки залишкові деформації не встигають розвинути, як і при ударному руйнуванні швидко наростаючою силою. Характерним для міцності реальних частинок геомодифікатора є масштабний фактор: збільшується міцність частинок із зменшенням їх розмірів в інтервалі $10^{-1} \dots 10^{-4}$ мм. Масштабний фактор пояснює різке підвищення складності процесу подрібнення при переході до тонких і субмікроскопічних фракцій частинок геомодифікатора.

Виявлено, що процес грубого помолу базується на розвитку наявних дефектів структури матеріалу частинок. Разом з тим при переході до більш дрібних фракцій частинок геомодифікатора дефекти в них стають більш рідкісними, а самі частинки –

більш міцними. Практична межа механічного диспергування частинок геомодифікатора становить від 1,0 до 0,1 мкм [36]. При подальшому подрібненні спостерігається утворення нових дефектів у майже ідеально міцних частинках і до їх подальшого накопичення і розвитку. У триботехнологіях припрацювання і відновлення основним завданням механоактивації частинок геомодифікатора є прискорення трибохімічної взаємодії частинок функціональних компонентів в першу чергу з робочими поверхнями трибоспряжень деталей, а також самоорганізація селективної взаємодії частинок компонентів геомодифікатора між собою. Розв'язання цього завдання вимагає субмікроскопічного і наномасштабного диспергування. Ступінь диспергування частинок визначається гранулометричним складом частинок компонентів геомодифікатора.

Дослідженню підлягали компоненти геомодифікатора КГМТ-1: Si, SiO₂, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃ та ін. Частинки кварцу SiO₂, активовані ударним напруженням утворюються, головним чином неправильної форми з гострими краями. Частинки кварцу, піддані подвійній ударній дії, мають округлу форму з гладкою поверхнею. Вторинні частинки кварцу, отримані шляхом ударних навантажень, мають розмір до 0,2 мкм, а при подвійному ударному впливі – не більше 0,01 мкм [33]. У відповідності до ступеня подрібнення частинки мають різні розміри питомої поверхні. При зменшенні їх розміру питома поверхня збільшується по мірі зростання переданої матеріалу механічної енергії, поки не досягається стан рівноважного подрібнення.

Показано, що вирішальна роль в зміні первинної структури належить матеріалу компонента геомодифікатора. При цьому істотним є взаємозв'язок між структурою і реакційною здатністю матеріалу подрібнених частинок. Якщо підсилюється інтенсивність механічного подрібнення, то зміни первинної та вторинної структур матеріалу частинок відбуваються в одному і тому ж напрямку. Разом з тим слід зазначити, що вторинна структура матеріалу частинок геомодифікатора важлива для поверхневих трибохімічних реакцій. На основі цього можливо пояснити механізм дії геомодифікаторів у формуванні наноструктурованих шарів на робочих поверхнях трибоспряжень деталей.

Визначено, що прискорення реакції взаємодії та зниження температури синтезу нових хімічних з'єднань елементів, нових фаз, можливо пояснити утворенням молекулярно-щільного контакту частинок різних компонентів геомодифікатора між собою і поверхнями трибоспряжень деталей, їх пластичного плину, завдяки активації локальної площини зсуву трибоконтракту. Час життя збуджених станів матеріалу частинок геомодифікатора зростає при пониженні температури, що свідчить про більш високу активність при низьких швидкісних режимах.

Виявлено, що з ростом температури рухливість частинок компонентів геомодифікатора починає зростати, йдуть процеси пригнічення, сповільнення та утворення дефектів і рекристалізації їх матеріалу, які пов'язані із зменшенням надлишкової ентропії. В процесі активації, після нетривалого диспергування, відбувається укрупнення частинок. Показано, що швидкість укрупнення частинок геомодифікатора тим вище, чим інтенсивніше підводиться механічна енергія, але фізико-механічні властивості матеріалу частинок компонентів знижуються. Утворення молекулярно-щільних агрегатів у процесі інтенсивного пластичного плину матеріалу частинок є одним з визначальних чинників твердофазного механохімічного синтезу.

З'ясовано, що формування молекулярно-щільних агрегатів компонентів геомодифікаторів, що містить в якості одного з основних компонентів MgO, в процесі механохімічної взаємодії обумовлює розвиток ланцюгової реакції за рахунок екзотермічного ефекту. З'ясовано, що експериментально спостережувані високі

температури в зоні трибоконтакту розвиваються за рахунок протікання трибохімічної реакції на ювенільній поверхні деталей трибоспряження й утворених нових поверхонь диспергованих частинок компонентів геомодифікатора. Інтенсивний локальний розігрів матеріалів рухомих спряжень деталей відіграє важливу роль у реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення при формуванні шарів вторинних структур активованих матеріалів частинок компонентів геомодифікатора.

Встановлено, що концентрація тріщин, порожнин, внутрішніх напружень у матеріалах частинок безперервно зменшується по мірі того, як в процесі розколювання їх розмір зменшується. Зі зменшенням розміру частинок підвищуються їх гомогенність і міцність. Визначено, що для забезпечення процесу більш глибокого подрібнення необхідні безперервно зростаючі механічні напруження. Ефективність такого диспергування частинок геомодифікатора можлива шляхом впливу на них деформацій розтягу. Внаслідок стискання частинок компонентів геомодифікатора в зоні локальних мікрооб'ємів, при виході з трибоконтакту, відбувається різкий спад навантаження на частинки після кожного обтиснення у замкнутому циклі роботи трибоспряження деталей. Визначено, що при імпульсному обтисненні твердих частинок SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 геомодифікатора КГМТ-1, порядку $900\text{...}1400 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-1}$, вихідні розміри частинок істотно зменшуються (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність розмірів частинок, геомодифікатора КГМТ-1 від часу диспергування за допомогою вібромлину та безпосередньо в зоні тертя при інтенсивності тиску $1000 \text{ МПа}\cdot\text{с}^{-1}$.

Компонент геомодифікатора	Умови диспергування	Розмір частинок геомодифікатора (нм) від тривалості випробувань (год.)			
		0,25	0,50	0,75	1,00
SiO_2	після диспергування вібромлином	1000	900	800	700
SiO_2	диспергування безпосередньо в зоні тертя	900	500	250	100
MgO	після диспергування вібромлином	900	750	600	500
MgO	диспергування безпосередньо в зоні тертя	300	200	150	100

Джерело: розроблено авторами

Визначено, що за короткий цикл навантаження-розвантаження в зоні контакту поверхонь трибоспряження деталей або зразків можлива реалізація диспергування частинок компонентів геомодифікатора до рівня оптимальної взаємодії з елементами системи трибоспряження деталей без пошкодження їх робочих поверхонь після припрацювання. Критерієм застосовності такого способу диспергування частинок різних матеріалів може слугувати відношення границі їх міцності на стиск до границі міцності на розтяг. Чим вище значення цього відношення, тим більш ефективним є спосіб подрібнення матеріалу компонентів геомодифікатора.

Отримані результати закономірностей зміни розмірів частинок компонентів геомодифікатора КГМТ-1 (табл. 2) на основі експериментальних досліджень.

Таблиця 2 – Закономірність зміни розмірів подрібнених частинок компонентів геомодифікатора КГМТ-1, які мають різні границі міцності (МПа), від інтенсивності об'ємного стиску ($\text{МПа} \cdot \text{с}^{-1}$)

Межі інтервалів міцності компонентів геомодифікатора, σ_B , МПа	Дисперсність частинок геомодифікатора (нм) від тривалості часу випробування (год.)		
	1	2	3
(0; 10)	400	150	120
(10; 50)	650	500	400
(50; 100)	1100	750	600
(100; 150)	1350	900	750

Джерело: розроблено авторами

Визначено, що для кожного компонента при визначеному імпульсі тиску об'ємного стиску існує певна границя диспергування. У вихідних частинках компонентів геомодифікатора з існуючими дефектами, коли основну роль відіграє не зародження, а розмноження дислокацій, то порогова енергія істотно мала в порівнянні з модулем зсуву $10^{-3} \dots 10^{-4}$. Гетерогенне виникнення точкових дефектів при наявності дислокацій або інших джерел дефектів вимагає подолання високого енергетичного бар'єру. У реальних кристалах матеріалів компонентів геомодифікатора КГМТ-1, що мають дефекти, пороговий рівень надлишкової енергії, необхідний для відтворення дефектів, є значно нижчим.

Виявлено, що при перевищенні граничного значення енергії починається зворотний процес – агрегування або спресовування субмікроскопічних частинок геомодифікатора. З'ясовано, що чим вище границя міцності матеріалу частинки компоненти, тим вище процес її подрібнення.

Встановлено, що якщо механічний імпульс тиску вищий за граничну величину і відсутнє мастильне середовище, в зазорі трибоспряжень зразків та деталей утворюються достатньо щільні, але порівняно малостійкі скупчення частинок компонентів геомодифікатора. При цьому у сформованого покриття каркас одержуваних агрегатів частинок компонентів геомодифікатора складають більш тверді і великі частинки, проміжки між якими заповнюються більш дрібними фракціями частинок різного складу.

При розробці схеми диспергування частинок геомодифікатора використовується ефект локальної зони поширення тиску на довжину $L \approx (3 \dots 4)\delta$, де δ – величина зазору між контактуючими спряженими зразками або деталями при об'ємному стиску $\sim 500 \dots 600$ МПа. При кожному циклі "підвищення тиску – зменшення тиску", що діє в мікрооб'ємі матеріалу частинок компонентів, в зоні трибоспряжень деталей утворюється своєрідна, безперервно змінювана область підшару, прилегла частина якого контактує з поверхневими шарами спряжених деталей за фізико-хімічним механізмом їх взаємодії. Мінімальна дисперсність частинок компонентів геомодифікаторів пропорційна енергонапруженості зони тертя спряження деталей і досягає величини $\sim 0,5$ нм. При дисипації енергії, що передається частинкам геомодифікатора при механічному диспергуванні в трибоспряженні деталей, швидко зникають збуджені стани, а зберігаються лише рівноважні метастабільні стани зі зміненою структурою матеріалів частинок.

З'ясовано, що умови рівноваги, які вимагаються згідно термодинаміки оборотних процесів, практично не виконуються. Разом з тим визначено, що співвідношення рівноважної термодинаміки можна застосовувати при обґрунтуванні характеру протікання трибохімічних реакцій у тих випадках, коли час життя дефекту

ґратки матеріалу частинок геомодифікатора, утвореного механічним шляхом, більше, ніж час їх протікання, в тому числі час встановлення рівноваги. Трибохімічна рівновага системи з матеріалами спряжених деталей, що піддаються активації в процесі експлуатації, можна розглядати як реально існуючу рівновагу, і застосовувати до неї співвідношення термодинаміки оборотних процесів [31].

Визначено, що трибомеханічний вплив на частинки компонентів геомодифікатора призводить не тільки до утворення певних типів дефектів кристалічної ґратки матеріалу, але і прискорює їх відпал. В важконавантажених трибоспряженнях деталей при трибомеханоактивації з'являється максимум концентрації дефектів ґратки їх матеріалів, положення якого залежить від матеріалу компонентів геомодифікатора і інтенсивності термомеханічного навантаження. Встановлено, що максимум залежності величини питомої поверхні $S_{\text{пит}}$ від тривалості механічної активації спостерігається для основних компонентів SiO_2 , MgO геомодифікатора КГМТ-1 при випробуваннях спряження зразків (табл. 3).

Можна бачити, що для компоненти SiO_2 геомодифікатора КГМТ-1 з малою вихідною поверхнею відбувається нелінійна зміна поверхні: швидке її збільшення на початку процесу, а після деякого періоду подрібнення досягається кінцева стаціонарна величина. Зазначимо, що зменшення поверхні подрібнюваних частинок компонент геомодифікатора пояснюється станом рівноваги Хюттига при подрібненні.

Таблиця 3 – Залежність величини питомої поверхні $S_{\text{пит}}$, від тривалості диспергування при подрібненні вібрмлином та безпосередньо в зоні тертя трибоспряжень зразків

Компонент геомодифікатора	Умови диспергування	Залежність питомої поверхні ($\text{м}^2/\text{г}$) від тривалості випробувань, год				
		0,25	0,50	0,75	1,00	2,0
SiO_2	після диспергування вібрмлином	2,5	2,4	5,2	8,2	10,3
SiO_2	диспергування безпосередньо в зоні тертя	6,2	12,4	13,2	14,0	14,2
MgO	після диспергування вібрмлином	2,1	3,4	5,8	7,2	8,0
MgO	диспергування безпосередньо в зоні тертя	3,4	5,8	9,6	20,0	25,0

Джерело: розроблено авторами

Виявлено, що для матеріалів компонентів геомодифікатора КГМТ-1 з сильно гомеоплярними зв'язками: SiO_2 , SiC , алюмосилікатний мінерал каолінит спостерігається процес аморфізації. Для визначення ступеня розупорядкованості тонкоподрібненої і субмікродиспергованої частинки матеріалу компонентів геомодифікатора використовуються параметри ступеня кристалічності і аморфізації. Для компоненти SiO_2 КГМТ-1 спостерігається деяке збільшення і подальше зменшення ступеня аморфізації в процесі диспергування в трибоконтаті зразків і деталей. Наслідком наявності аморфної фази кремнію $\alpha\text{-Si}$ в зоні рухомого контакту зразків і деталей і перекладеної імпульсними трибоджерелами в активний структурно-нестійкий стан аморфно-кристалічної $\alpha\text{-}k$ -границі поділу, є кристалізація $\alpha\text{-Si}$ з утворенням зносостійкого шару полікристалічного $k\text{-Si}$ на робочих поверхнях деталей трибоспряження в діапазоні температур, що виникають на плямах фактичного контакту.

Час охолодження мікрооб'ємів матеріалів функціональних сполук (α -Si) геомодифікатора, що вийшли з контакту, а також поверхонь контакту спряжених деталей від температури спалаху до середньої температури робочої поверхні, протікають в умовах швидкостей ковзання зразків і деталей 3-4 м/с, складає $10^{-5} \dots 10^{-6}$ с. Через те, що час релаксації стабільної кристалічної структури еквіатомного металу складає близько 10^{-13} с, то можна стверджувати, що відповідні структури поверхневих шарів трибоспряжень матеріалу деталей в "пасивному" стані повністю кристалізовані. Аморфно-кристалічна будова α -Si- k -Si границі поділу фаз, насиченою додатковими компонентами геомодифікатора і киснем з робочого середовища, що передбачає перевищення часу релаксації стабільної кристалічної структури вказане значення то спостерігається необхідний дифузійний перерозподіл чужорідних атомів. Ці стани виявляються зв'язаними в стійкі, але малорухомі комплекси (кластери), при низькій температурі робочого середовища за межами зони контакту.

Найбільш ймовірна фіксація аморфно-кристалічного стану матеріалу частинок при наявності в загартованому з високою швидкістю α -Si \rightarrow k -Si домішкових елементів, що гальмують при переохолодженні формування рівноважних кристалічних фаз k -Si. Фіксація на виході з трибоконтракту спряжених деталей метастабільної структури сформованого поверхневого трибошару забезпечує зниження енергії переходу мікрооб'ємів цього шару в "активний" стан при повторенні контакту. Позитивний ефект від фіксації метастабільної аморфно-кристалічної структури пов'язаний з тим, що ця структура має більш низьку енергію переходу в активний стан, що реалізує локалізацію зсуву при спостереженні процесу ковзання в найтоншому поверхневому шарі матеріалу деталей трибоспряження.

Слід зазначити, що зсувна компонента трибомеханічного контакту, не зміщуючи рівноваги між багатокомпонентною речовиною геомодифікатора КГМТ-1 і продуктом реакції, надає сильний вплив на швидкість процесу формування наноструктурованих трибошарів на робочих поверхнях деталей спряжень. Деформація зсуву матеріалів поверхневих шарів з притаманними їй зміщеннями атомів один відносно одного сприятлива для структурних змін, а деформація всебічного стиснення, пов'язана зі зменшенням або збільшенням міжатомних відстаней, значно рідше супроводжується хімічними ефектами.

Встановлено, що у багатьох випадках відбувається не тільки зміна швидкості реакції на ювенільній поверхні трибоконтракту спряжень деталей в результаті активації елементів системи спряження, але і зміна механізму каталітичного процесу. Це дозволяє шляхом механічної активації підвищувати селективність дії каталізатору Al_2O_3 , що міститься в геомодифікаторі КГМТ-1 більше ніж 4% за масою як його компонента. Особливу увагу заслуговує той факт, що механокаталіз в трибоспряженні деталей протікає в умовах, коли одночасно відбувається каталітична реакція і механічний вплив. Аморфізація SiO_2 та Al_2O_3 відбувається нетермічним процесом активування. Зазначимо також, що після хемосорбції на активних центрах поверхні тертя ініціюється утворення і зростання зародків функціональних силіцидних покриттів на робочих поверхнях деталей трибоспряження. Після утворення продукту твердофазної хімічної реакції, в залежності від співвідношення молекулярних об'ємів продукту і вихідної речовини компонентів геомодифікатора КГМТ-1, процес буде продовжуватися в кінетичному режимі або перейде у дифузійну область.

Висновки:

1. Встановлено, що найбільш обґрунтованим напрямком застосування методів активації й подрібнення частинок компонентів геомодифікатора КГМТ-1, а також механохімічних твердофазних їх реакцій є трибофізичні процеси в зоні рухомих

спряжень деталей систем і агрегатів транспортних засобів.

2. Здійснення гетерогенних трибохімічних реакцій у зоні трибоконтракту деталей в момент механічної активації частинок компонентів геомодифікаторів природного мінералу, як багатокомпонентної суміші призводить до якісно нових ефектів та полегшує протікання трибохімічної взаємодії активованих частинок геомодифікаторів КГМТ-1 з поверхнями тертя.

3. З'ясовано механізм самоорганізації диспергування компонентів геомодифікаторів тертя, коли швидкість швидкість протікання реакції визначається пластичною деформацією твердих частинок в трибоспряженні. Формування молекулярно-щільних агрегатів частинок геомодифікатора ініціює реалізацію процесу активації подрібненням, в якому може розвиватися самопідтримуюча реакція за рахунок екзотермічного ефекту.

4. Показано, що розупорядковані аморфні матеріали частинок компонентів геомодифікатора, містять структурні і стехіометричні дефекти, які підвищують їх реакційну здатність й спостерігається прояв нових властивостей у вигляді формування зносостійких наноструктурованих трибошарів на робочих поверхнях деталей спряжень.

5. Отримані результати дозволяють вирішити важливе завдання застосування мінеральної сировини – геомодифікатору КГМТ-1, шляхом диспергування частинок його компонентів в трибоспряженні: підвищення ресурсу функціонування рухомих спряжень систем і агрегатів транспортних машин формуванням захисних покриттів на робочих поверхнях деталей та створенням нових більш ефективних триботехнологій припрацювання та відновлення.

Список літератури

1. Горский В.В. Масштабный скачок и формирование аморфно-кристаллических сплавов в явлении структурной приспособляемости металлов при трении в активных средах. *Трение и износ*. 1993. №1. С.34-41.
2. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
3. Аулін В.В., Кузик О.В., Лисенко С.В., Вербицький О.В. Особливості структурно-фазових перетворень в матеріалах деталей машин та механізмів при терті. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 225-227.
4. Аулін В.В., Чернай А.Є., Лукашук А.П. До фізичної природи швидкоплинних процесів у поверхневих шарах деталей трибоспряжень. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability*: Матеріали 1^{ої} Міжнародної науково-практичної конференції, 17-19 квітня 2019 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С.13-14.
5. Аулін В.В., Лисенко С.В., Жилова І.В., Лисенко В.М. Фізична мезомеханіка зношування робочих поверхонь деталей трибоспряжень мобільної сільськогосподарської і автотранспортної техніки. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 223-225.
6. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В., Жилова І.В. Фізико-мезомеханічний підхід до виявлення характеру зношування спряжень деталей сільськогосподарської і автотранспортної техніки. *Проблеми трибології*. Хмельницький: ХНУ, 2017. №4 С.82-86.
7. Аулін В.В., Жилова І.В., Лисенко С.В. Мезомеханіка – сучасний підхід до теорії зношування. *Підвищення надійності машин і обладнання*: зб. тез доповідей XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 75-77.
8. Аулін В.В., Кузик О.В., Жилова І.В., Лукашук А.П. Трибофізикоматеріалознавчий підхід при оцінці ресурсу деталей мобільної сільськогосподарської техніки. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки*: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. С. 227-228.
9. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Чернай А.Є., Лукашук А.П. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей

- транспортних засобів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. Науковий журнал*. 2018, №1(10). С.5-11.
10. Аулін В.В., Вербицький О.В., Лисенко С.В., Лукашук А.П. Тертя та зношування – взаємозв'язані процеси в контактній зоні трибоспряжень деталей автотранспортної та сільськогосподарської техніки. *Підвищення надійності машин і обладнання: Зб. тез доповідей XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців*. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 73-75.
 11. Аулін В.В., Кропівний В.М., Кузик О.В. Формування структури високоміцних чавунів при виготовленні та лазерній модифікації деталей машин. *Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: International research and practice conference: Conference proceedings, December, 27-28 2017*. Radom: Izdevnieciba "Baltija Publishing". P. 103-106.
 12. Aulin V., Zamota T., Hrynkiv A., Lysenko S. at all. Increase of formation efficiency of gears contact spot at electrochemical-mechanical running-in. *Проблеми трибології (Problems of tribology)*. Хмельницький. ХНУ, 24 (4/94) (2019). С.33-39.
 13. Аулін В.В., Тарнавський Д.В. Системне застосування триботехнологій припрацювання і відновлення на етапах життєвого циклу засобів транспорту. *Підвищення надійності машин і обладнання: зб. тез доповідей XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих науковців*. Кропивницький: ЦНТУ, 2018. С. 86-87.
 14. Аулін В.В., Диха О.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Вплив режиму мащення на триботехнічні характеристики поверхні спряжень деталей дизелів автомобілів. *Інноваційні технології розвитку та ефективності функціонування автомобільного транспорту: збірник наукових матеріалів міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. ЦНТУ, м.Кропивницький, Україна, 14-15 листопада 2018 р.. Кропивницький. 2018. С.218-240.
 15. Аулін В.В., Деркач О.Д., Макаренко Д.О., Гриньків А.В. Вплив режимів експлуатації на зношування деталей, виготовлених з полімерно-композитного матеріалу. *Проблеми трибології*. Хмельницький: ХНУ, 2018. №4 С.65-69.
 16. Аулін В.В., Деркач О.Д., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Вплив фулереновмісних олиव на фізико-механічні властивості поверхні тертя спряжень деталей. *Проблеми трибології*. Хмельницький: ХНУ, 2018. №4 С.60-64.
 17. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Чернай А.Е., Лукашук А.П. Системно-спрямований підхід до розробки технологій безрозбірного відновлення спряжень деталей. *Крамаровські читання: зб. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції*, 21-22 лют. 2019 р., м. Київ, НУБіП. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. С. 94-96.
 18. Аулін В.В., Лисенко С.В., Жилова І.В., Вербицький О.В. Синергетика підвищення зносостійкості і надійності трибоспряжень деталей систем і агрегатів машин. *Крамаровські читання: зб. тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції*, 21-22 лют. 2019 р., м. Київ, НУБіП. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2019. С. 127-129.
 19. Аулін В.В., Лисенко С.В., Жилова І.В., Вербицький О.В. Синергетичне підвищення надійності трибоспряжень деталей систем і агрегатів транспортних машин. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: матеріали 10ї Міжнародної науково-практичної конференції*, 17-19 квітня 2019 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С.7-8.
 20. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Жилова І.В. Проблеми створення smart- покриттів в зеленій трибології. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: матеріали 10ї Міжнародної науково-практичної конференції*, 17-19 квітня 2019 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2019. С.53-56.
 21. Aulin V., Lysenko S., Lyashuk O., Hrynkiv A., Velykodnyi D., Vovk Y., Holub D., Chernai A. Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. *Tribology in Industry*. Vol. 41, No. 2 (2019). P. 156-165.
 22. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Dykha A., Zamota T., Dzyura V. Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 3 (12 - 99). P. 6-16.
 23. Aulin V., Lysenko S., Hrynkiv A., Chernai A., Zhylova I., Lukashuk A. Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. *Проблеми трибології*. Хмельницький. ХНУ, 2019. №2 С.55-60.
 24. Aulin V., Derkach O., Makarenko D., Hrynkiv A., Pankov A., Tykhyi A. Analysis of tribological efficiency of movable junctions "polymeric-composite materials – steel" *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4 (12-100). P. 6-15.
 25. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Lyashuk O., Zamota T., Holub D. Studying the tribological properties of mated materials C61900-A48-25BC1.25BNo.25 in composite oils containing geomodifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5 (12-101). P. 38-47.

26. Aulin V., Lyashuk O., Hrynkiv A., Lysenko S., Zamota T., Vovk Y., Pankov A., Tykhyi A., Horkunenko A. Determination of the rational composition of the additive to oil with the use of the Katerynivka friction geo modifier. *Tribology in Industry*. Vol. 41. No. 4 (2019). P.548-562.
27. Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Zamota T., Pankov A., Tykhyi A. Determining the rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6 (12-102). P. 52-64.
28. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В. Модель надійності деталей транспортних машин за процесами реалізації триботехнологій їх припрацювання і відновлення. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2019. Вип. 2(33). С.50-64.
29. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В., Чернай А.Є., Лукашук А.П. Процес зміни стану оливи при припрацюванні спряжень деталей та обкатці двигунів транспортних машин *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 15-17 квітня 2020 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С.162-165.*
30. Аулін В.В., Лисенко С.В., Гриньків А.В., Чернай А.Є., Лукашук А.П. Оптимальне керування режимами функціонування трибоспряминами деталей систем і агрегатів транспортних машин. *Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 15-17 квітня 2020 р., Кропивницький: ЦНТУ, 2020. С.178-179.*
31. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. Новосибирск: Наука, 1986. 303с.
32. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твердых веществ. *Успех химии*. 2006. 75 (3). С.203-216.
33. Ткаченко Э.А. Трибохимические аспекты геомодификаторов трения. *Перспективные материалы, покрытия и технологии. Предельные состояния элементов конструкций* Матер. межд. научн. техн. конференции. Севастополь. 2011. С.107-115.
34. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах. Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2014. 369 с.
35. Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузик О.В., Гриньків А.В., Голуб Д.В. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія. Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2016. 303 с.
36. Аулін Віктор Васильович. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки. Дисертація д-ра техн. наук: 05.02.04, Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 360 с.

References

1. Gorskiy, V.V. (1993). Masshtabnyiy skachok i formirovanie amorfno-kristallicheskih splavov v yavlenii strukturnoy prispособlivaemosti metallov pri trenii v aktivnyih sredah [Large-scale jump and formation of amorphous-crystalline alloys in the phenomenon of structural adaptability of metals by friction in active media]. *Trenie i iznos - Friction and wear, 1*, 34-41 [in Russian].
2. Kragelskiy, I.V., Dobyichin, M.N. & Kombalov, V.S. (1977). *Osnovniy raschetov na trenie i iznos [Basics of calculations for friction and wear]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
3. Aulin, V.V., Kuzyk O.V., Lysenko, S.V. & Verbytskyi, O.V. (2017). Osoblyvosti strukturno-fazovykh peretvoren v materialakh detalei mashyn ta mekhanizmiv pry terti [Features of structural-phase transformations in materials of details of machines and mechanisms at friction]. Problemy konstruiuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsii silskohospodarskoi tekhniki: *materialy XI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - materials of the XI International scientific-practical conference*. Kropyvnytskyi: TsNTU, 225-227 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Chernai, A.Ie. & Lukashuk, A.P. (2019). Do fizychnoi pryrody shvydkoplynykh protsesiv u poverkhnykh sharakh detalei trybospriazhen [To the physical nature of transient processes in the surface layers of tribocouple parts]. *Increase of Machine and Equipment Reliability: Materialy 1oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference, 17-19 kvitnia 2019 r., Kropyvnytskyi: TsNTU, 13-14* [in Ukrainian].
5. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zhylova, I.V. & Lysenko, V.M. (2017). Fizychna mezomekhanika znoshuvannya robochykh poverkhon detalei trybospriazhen mobilnoi silskohospodarskoi i avtotransportnoi tekhniki [Physical mesomechanics of wear of working surfaces of details of tribocouples of mobile agricultural and motor transport equipment]. Problems of design, production and operation of agricultural machinery: *materialy XI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - materials of the XI International scientific-practical conference*. Kropyvnytskyi: TsNTU, 223-225 [in Ukrainian].

6. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V. & Zhylova, I.V. (2017). Fyzyko-mezomekhanichni pidkhd do vyjavlennia kharakteru znoshuvannia spriazhen detalei silskohospodarskoi i avtotransportnoi tekhniky [Physico-mesomechanical approach to identifying the nature of wear of the joints of parts of agricultural and motor vehicles]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology*. Khmelnytskyi: KhNU, 4, 82-86 [in Ukrainian].
7. Aulin, V.V., Zhylova, I.V. & Lysenko, S.V. (2018). Mezomekhanika – suchasnyi pidkhd do teorii znoshuvannia [Mesomechanics - a modern approach to the theory of wear]. Improving the reliability of machinery and equipment: *zb. tez dopovidei KhII Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv - Coll. abstracts of the XII All-Ukrainian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists*. Kropyvnytskyi: TsNTU, 75-77 [in Ukrainian].
8. Aulin, V.V., Kuzyk, O.V., Zhylova, I.V. & Lukashuk, A.P. (2017). Trybofizykomaterialoznavchyi pidkhd pry otsyntsi resursu detalei mobilnoi silskohospodarskoi tekhniky [Tribophysico-material approach in estimating the resource of mobile agricultural machinery parts]. Problems of design, production and operation of agricultural machinery: *materialy XI Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii - materials of the XI International scientific-practical conference*. Kropyvnytskyi: TsNTU, 227-228 [in Ukrainian].
9. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hrynkiv, A.V., Chernai, A.Ie. & Lukashuk, A.P. (2018). Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies for increase of wear resistance and durability of conjugations of details of vehicles]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovyi zhurnal - Modern technologies in mechanical engineering and transport. Scientific journal*, 1(10), 5-11 [in Ukrainian].
10. Aulin, V.V., Verbytskyi, O.V., Lysenko, S.V. & Lukashuk, A.P. (2018). Tertia ta znoshuvannia – vzaïmozv'iazani protsesy v kontaktній zoni trybospriazhen detalei avtotransportnoi ta silskohospodarskoi tekhniky [Friction and wear - interconnected processes in the contact zone of the triad couplings of parts of motor vehicles and agricultural machinery]. Improving the reliability of machinery and equipment: *Zb. tez dopovidei KhII Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv - Coll. abstracts of the XII All-Ukrainian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists*. Kropyvnytskyi: TsNTU, 73-75 [in Ukrainian].
11. Aulin, V.V., Kropivnyi, V.M. & Kuzyk, O.V. (2017). Formuvannia struktury vysokomitsnykh chavuniv pry vyhotovlenni ta lazernii modyfikatsii detalei mashyn [Formation of the structure of high-strength cast iron in the manufacture and laser modification of machine parts]. Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences: *International research and practice conference: Conference proceedings*, December, 27-28 2017. Radom: Izdavneciba "Baltija Publishing". P. 103-106 [in Ukrainian].
12. Aulin, V., Zamota, T., Hrynkiv, A., Lysenko, S. at all. (2019). Increase of formation efficiency of gears contact spot at electrochemical-mechanical running-in. *Problems of tribology*. Khmelnytskyi. KhNU, 24 (4/94). S.33-39 [in English].
13. Aulin, V.V. & Tarnavskiy, D.V. (2018). Systemne zastosuvannia trybotekhnolohii prypratsiuvannia i vidnovlennia na etapakh zhyttievoho tsykladu zasobiv transportu [Systematic application of tribotechnologies of running-in and restoration at the stages of the life cycle of vehicles]. Improving the reliability of machinery and equipment: *zb. tez dopovidei KhII Vseukrainskoi naukovopraktychnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodykh naukovtsiv - Coll. abstracts of the XII All-Ukrainian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists*. Kropyvnytskyi: TsNTU, 86-87 [in Ukrainian].
14. Aulin, V.V., Dykha, O.V., Lysenko, S.V. & Hrynkiv, A.V. (2018). Vplyv rezhymu mashchennia na trybotekhnichni kharakterystyky poverkhni spriazhen detalei dyzeliv avtomobiliv [Influence of lubrication mode on tribotechnical characteristics of the interface surface of diesel car parts]. Innovative technologies for the development and efficiency of road transport: *zbirnyk naukovykh materialiv mizhnarodnoi naukovopraktychnoi internet-konferentsii - a collection of scientific materials of the international scientific-practical Internet conference*. TsNTU, m.Kropyvnytskyi, Ukraina, 14-15 lystopada 2018 r.. Kropyvnytskyi, 218-240 [in Ukrainian].
15. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Makarenko, D.O. & Hrynkiv, A.V. (2018). Vplyv rezhymiv ekspluatatsii na znoshuvannia detalei, vyhotovlenykh z polimerno-kompozytnoho materialu [Influence of operating modes on wear of parts made of polymer-composite material]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology*. Khmelnytskyi: KhNU, 4, 65-69 [in Ukrainian].
16. Aulin, V.V., Derkach, O.D., Lysenko, S.V. & Hrynkiv, A.V. (2018). Vplyv fullerenovmisnykh olyv na fyzyko-mekhanichni vlastyvy poverkhni tertia spriazhen detalei [Influence of fullerene-containing oils on physical and mechanical properties of the friction surface of parts]. *Problemy trybolohii - Problems of*

- tribology. Khmelnytskyi: KhNU, 4, 60-64 [in Ukrainian].
17. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hrynkiv, A.V., Chernai, A.E. & Lukashuk, A.P. (2019). Systemno-spriamovanyi pidkhid do rozrobky tekhnolohii bezrozbirnoho vidnovlennia spriazhen detalei [System-oriented approach to the development of technologies for disassembly of conjugation of parts]. Kramarov readings: *zb. tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii - collection. abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference*, 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv, NUBiP. – K.: Vydavnychi tsestr NUBiP Ukrainy, 94-96 [in Ukrainian].
 18. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zhylova, I.V. & Verbytskyi, O.V. (2019). Synerhetyka pidvyshchennia znosostikosti i nadiinosti trybospriazhen detalei system i ahrehativ mashyn [Synergetics of increase of wear resistance and reliability of tribocouples of details of systems and units of cars]. Kramarov readings: *zb. tez dopovidei VI Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii - collection. abstracts of the VI International Scientific and Technical Conference*, 21-22 liut. 2019 r., m. Kyiv, NUBiP. – K.: Vydavnychi tsestr NUBiP Ukrainy, 127-129 [in Ukrainian].
 19. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zhylova, I.V. & Verbytskyi, O.V. (2019). Synerhetychne pidvyshchennia nadiinosti trybospriazhen detalei system i ahrehativ transportnykh mashyn [Synergetic increase of reliability of tribocouples of details of systems and units of transport cars]. Increase of Machine and Equipment Reliability: *materialy 1oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - materials of the 1st International scientific-practical conference*, 17-19 kvitnia 2019 r., Kropyvnytskyi: TsNTU, 7-8 [in Ukrainian].
 20. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hrynkiv, A.V. & Zhylova, I.V. (2019). Problemy stvorennya smart-pokryttiv v zelenii trybolohii (2019). Increase of Machine and Equipment Reliability: *materialy 1oi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - materials of the 1st International scientific-practical conference*, 17-19 kvitnia 2019 r., Kropyvnytskyi: TsNTU, 53-56 [in Ukrainian].
 21. Aulin, V., Lysenko, S., Lyashuk, O., Hrynkiv, A., Velykodnyi, D., Vovk, Y., Holub, D. & Chernai, A. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating in oil composite with geo modifier KGMF-1. *Tribology in Industry, Vol. 41, 2*, P. 156-165 [in English].
 22. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Dykha, A., Zamota, T. & Dzyura, V. (2019). Exploring a possibility to control the stressed-strained state of cylinder liners in diesel engines by the tribotechnology of alignment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3 (12 - 99). P. 6-16 [in English].
 23. Aulin, V., Lysenko, S., Hrynkiv, A., Chernai, A., Zhylova, I. & Lukashuk, A. (2019). Wear resistance increase of samples tribomating "Steel 45-cast iron SCH20" with geo modifier KGMF-1. *Problemy trybolohii. Khmelnytskyi. KhNU*, 2, 55-60 [in English].
 24. Aulin, V., Derkach, O., Makarenko, D., Hrynkiv, A., Pankov, A. & Tykhyi, A. (2019). Analysis of tribological efficiency of movable junctions "polymeric-composite materials – steel" *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4 (12-100)*, P. 6-15 [in English].
 25. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Lyashuk, O., Zamota, T. & Holub, D. (2019). Studying the tribological properties of mated materials C61900-A48-25BC1.25BNo.25 in composite oils containing geomodifiers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 5 (12-101)*, P. 38-47 [in English].
 26. Aulin, V., Lyashuk, O., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Zamota, T., Vovk, Y., Pankov, A., Tykhyi, A. & Horkunenko, A. (2019). Determination of the rational composition of the additive to oil with the use of the Katerynivka friction geo modifier. *Tribology in Industry, Vol. 41, 4*, P.548-562 [in English].
 27. Aulin, V., Hrynkiv, A., Lysenko, S., Zamota, T., Pankov, A. & Tykhyi, A. (2019). Determining the rational composition of tribologically active additive to oil to improve characteristics of tribosystems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6 (12-102)*, P. 52-64 [in English].
 28. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. & Hrynkiv, A.V. (2019). Model nadiinosti detalei transportnykh mashyn za protsesamy realizatsii trybotekhnolohii yikh prypratsiuvannia i vidnovlennia [The model of reliability of details of transport cars on processes of realization of tribotechnologies of their running in and restoration]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences, Vol. 2(33)*, 50-64 [in Ukrainian].
 29. Aulin, V.V., Hrynkiv, A.V., Lysenko, S.V., Chernai, A.Ie. & Lukashuk, A.P. (2020). Protse zminy stanu olyvy pry prypratsiuvanni spriazhen detalei ta obkattsi dvyhuniv transportnykh mashyn [The process of changing the state of the oil during the running-in of the couplings of parts and running-in of engines of transport machines]. Increase of Machine and Equipment Reliability: *materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii - materials of the International scientific-practical conference*, 15-17 kvitnia 2020 r., Kropyvnytskyi: TsNTU, 162-165 [in Ukrainian].
 30. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Hrynkiv, A.V., Chernai, A.Ie. & Lukashuk, A.P. (2020). Optymalne keruvannya rezhymamy funktsionuvannia trybospriazhenniamy detalei system i ahrehativ transportnykh mashyn [Optimal control of modes of operation of tribocouples of details of systems and units of transport cars]. Increase of Machine and Equipment Reliability: *materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi*

- konferentsii* (15-17 kvitnia 2020 r.) - *materials of the International Scientific and Practical Conference*, Kropyvnytskyi: TsNTU, 178-179 [in Ukrainian].
31. Avvakumov, E.G. (1986). *Mekhanicheskie metody aktivatsii himicheskikh protsessov [Mechanical methods of activation of chemical processes]*. Novosibirsk: Nauka [in Russian].
 32. Boldyrev, V.V. (2006). *Mehanohimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tverdyih veschestv [Mechanochemistry and mechanical activation of solids]*. *Uspeh himii - The success of chemistry*, 75(3), 203-216 [in Russian].
 33. Tkachenko, E.A. (2011). *Tribohimicheskie aspekty geomodifikatorov treniya [Tribophysical aspects of friction geomodifiers]*. Promising materials, coatings and technologies. Limit states of structural elements: *mater. mezhd. nauchn. tehn. konferentsii - Mater. Int. Scientific Tech. Conference*. Sevastopol, 107-115 [in Russian].
 34. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorhanizatsii v trybotekhnichnykh systemakh [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems]*. Kirovohrad: Lysenko V.F., 369 [in Ukrainian].
 35. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V., Hryniv, A.V. & Holub, D.V. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki tekhnolohiiamy trybotekhnichnoho vidnovlennia: monohrafiia [Tribophysical bases of increase of reliability of mobile agricultural and motor transport technics by technologies of tribotechnical restoration: monograph]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V. F., 303 [in Ukrainian].
 36. Aulin, V.V. (2015). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia znosostiikosti detalei ta robochykh orhaniv silskohospodarskoi tekhniki [Tribophysical bases of increase of wear resistance of details and working bodies of agricultural machinery]*. *Doctor's thesis*, Khmelnyts. nats. un-t. Khmelnytskyi, 360 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Sergey Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andriy Grinkiv**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Andriy Chernai**, post-graduate, **Viktor Slon**, applicant, **Andriy Lukashuk**, post-graduate *Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine*

Influence of the Processes Occurring in the Movable Interfaces of the Parts of Transport Machines Under the Action of the Components of the Geomodifier on the Efficiency of Tribotechnologies of Running-in and Recovery

It is shown that the effectiveness of the implementation of tribotechnologies for running-in and restoration of systems and assemblies of transport machines depends on the preparation of the working environment in which the running-in of tribocouplings of parts takes place. When using a geomodifier to add to engine and transmission oil, it is important to refine the particles of its components and obtain special properties of their surfaces. The properties of the main components of the KGMT-1 geomodifier: SiO₂, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃ are considered. Their activation during grinding and feeding into the friction zone is substantiated.

The change in the size of the particles of the components of the geomodifier on the duration of the test under various operating conditions and within the limits of the strength intervals was investigated. The course of various physical processes according to nonequilibrium thermodynamics and the realization of states and processes of self-organization are considered. It was found that, depending on the degree of fragmentation, the particles of the components exhibit different activity, and therefore, different conditions for the formation of protective coatings on the working surfaces of parts and tribomechanical and tribophysical effects on particles are realized. It is shown that the latter manifests itself during the formation of defects, specific surface area, and duration of mechanical activation. It was revealed that for the materials of the KGMT-1 geomodifier components with strongly homeopolar bonds, such as SiO₂, SiC, and the aluminosilicate mineral kaolinite, an amorphization process is observed.

The influence of the α -Si-k-Si phase transformation in the materials of the KGMT-1 additive on the efficiency of the implementation of tribotechnologies has been determined. It is shown how physical processes in a composite oil cause tribochemical reactions and formation of coatings on the working surfaces of interfaces of parts of systems and aggregates of transport machines.

mechanical activation, dispersion of particles, geomodifiers of friction, mating of parts, lubricating medium, tribochemical reactions

Одержано (Received) 25.09.2020

Прорецензовано (Reviewed) 30.09.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020