

**Аулін В.В.,
Лисенко С.В.,
Кузик О.В.,
Жилова І.В.**

Центральноукраїнський національний
технічний університет,
м. Кропивницький, Україна
E-mail: AulinVV@gmail.com

ФІЗИКО - МЕЗОМЕХАНІЧНИЙ ПІДХІД ДО ВІЯВЛЕННЯ ХАРАКТЕРУ ЗНОШУВАННЯ СПРЯЖЕНЬ ДЕТАЛЕЙ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ І АВТОТРАНСПОРТНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 621.891

Розглянуто сутність фізико-мезомеханічного підходу до виявлення характеру зношування спряжень деталей машин. Враховуючи характер фрагментації поверхневого шару деталей, з'ясовано механізм його зношування. Показано, які зміни відбуваються в поверхневому шарі, якщо він зміцнений потоком енергії та нанесенням покриттів, зазначені їх особливості. На прикладі зношування трибоспряжень за різними схемами виявлено кореляцію між інтенсивністю зношування і формуванням вихрової фрагментації мезовихрової структури. З'ясовано, що зміцнена поверхня деталі блокує зародження в її основі мезовихрові структури і цим сприяє зростанню зносостійкості. Сформульовані основні вимоги до критеріїв зміцнення деталей трибоспряжень. Розроблено рекомендації до створення та вибору ефективних технологій зміцнення сільськогосподарської та автотранспортної техніки.

Ключові слова: тертя, зношування, мезомеханіка, поверхневий шар, деталь, зміцнення, фрагментована структура, мезооб'єм, ротаційна пластичність, зносостійкість.

Вступ

Один з найбільш поширених і в той же час найбільш складних видів руйнування робочих поверхонь спряжень деталей сільськогосподарської та автотранспортної техніки (САТТ) при експлуатації, є зношування їх матеріалів. Відомо, що локальне руйнування матеріалу в зоні фрикційного контакту деталей може розвиватися в сильно нерівноважних умовах, з підвищенням температури, схоплюванням, окисленням та багатьма іншими процесами [1, 2]. При розробці матеріалів трибоспряжень деталей систем і агрегатів САТТ використовують критерії міцності і зносостійкості, які безпосередньо пов'язані з механікою локального руйнування і утворенням вільних частинок зносу [3, 4].

Аналіз трибологічних методів дослідження процесів тертя та зношування свідчить, що найбільш ефективними для цього є методи фізичної мезомеханіки [1]. Більше двох десятиліть Томська школа матеріалознавців (Росія) успішно розвиває новий науковий напрям в області фізики пластичності і міцності – фізична мезомеханіка структурно неоднорідних матеріалів [6, 7]. Інтенсивно ведуться дослідження по поведінці матеріалів деталей при механічному навантаженні і при терті та зношуванні на основі уявлень фізичної мезомеханіки. В фізичній мезомеханіці поверхневий шар деталі розглядають, як багаторівневу самоузгоджену систему. Використання цього підходу для розв'язання проблем тертя та зношування є особливо перспективним, оскільки для ефективного підвищення зносостійкості матеріали деталей піддаються поверхневому зміцненню концентрованими потоками енергії фізичних полів або нанесенню на їх робочі поверхні високоміцних покриттів та реалізації ефекту самоорганізації матеріалу поверхневого шару [1].

Поверхневий шар деталі є типовим багаторівневим неоднорідним конденсованим середовищем з системою рівноважних і нерівноважних вторинних структур. Традиційна механіка описує матеріал поверхневого шару деталей на макромасштабному рівні, не враховуючи його внутрішньої структури. В той час фізика пластичності і міцності твердих тіл враховує внутрішню його структуру і поведінку ансамблів $10^8 \dots 10^{12}$ дислокацій, які мікромасштабному рівні описати їх математично неможливо. Поведінку такого неоднорідного середовища під навантаженням в процесі тертя та зношування доцільно розглядати з позицій фізичної мезомеханіки, в основі якій лежить рух на мезорівні тривимірних структурних елементів (мезооб'ємів) за схемою "зсув+поворот". Число мезооб'ємів є невеликим і підкоряється рівнянням звичайної механіки. При цьому процеси на мікрорівні враховуються, як акомодатії на основі континуальної теорії дислокацій [8]. Усереднювання руху кінцевого числа мезооб'ємів дозволяє отримати макроопис робочої поверхні деталі, що деформується, з врахуванням складної внутрішньої структури поверхневого шару.

Крім того в основі методології фізичної мезомеханіки матеріалів поверхневого шару деталей трибоспряжень лежать синергетичні уявлення, оскільки будь-які пластичні зсуви у навантаженому поверхневому шарі матеріалу деталі розглядаються, як втрата зсувної стійкості матеріалу в локальних контактних областях концентраторів напружень. Змінюючи стан поверхневого шару деталі, можна істотно змінювати межу текучості матеріалу, опір деформації, його пластичність, втомну міцність та зносостійкість в трибоспряженнях системах і агрегатах САТТ. Зазначене слід враховувати при виборі способів зміцнення поверхневих шарів деталей трибоспряжень та оптимізацією їх технологічних параметрів.

Разом з тим потребує уточнення сам механізм зношування поверхневих шарів при різних режимах тертя та при використанні різних типів спряжень деталей в стаціонарних та динамічних навантаженнях і зміцнення різними технологіями.

Метою роботи є з'ясування механізму зношування поверхневих шарів деталей САТТ при їх зміцненні на основі фізико - мезомеханічного підходу.

Виклад основного матеріалу

З точки зору уявлень мезомеханіки незалежно від умов тертя і конкретних механізмів зношування, базова модель цих процесів відображає зародження, еволюцію і механізм відриву дискретних частинок зносу від поверхні тертя у контактній локальній області. При цьому враховується виникнення в навантаженому матеріалі поверхневих шарів деталей локальних концентраторів напружень, пов'язаних з ними миттєвих напружень та вихровий характер руху мезооб'ємів. Останнє супроводжується виникненням на першій стадії локальних несучільностей і мікротріщин, а завершується розвитком магістральної тріщини і руйнуванням матеріалу деталі. Зазначене в фізичній мезомеханіці лежить в основі формування і відриву будь-яких дискретних частинок зносу.

Механізм формування і відриву дискретної частинки зносу за своєю суттю пов'язаний з вихровим характером пластичного плину матеріалу у приповерхневих шарах тертя. Цей процес розвивається самоузгоджено в ієрархії мікро- і мезомасштабних рівнів. Для побудови моделі зношування на основі фізичної мезомеханіки, необхідно:

- ідентифікувати масштабні рівні самоузгодженої пластичної деформації в приповерхневих шарах зони тертя деталей;
- кількісно охарактеризувати вихровий характер деформації в ієрархії самоузгоджених мікро- і мезомасштабних рівнів деформації;
- розкрити механізм формування і відриву дискретних частинок зносу в умовах вихрового характеру деформації в приповерхневих шарах матеріалу деталі.

З точки зору фізико-мезомеханічного підходу зношування трактується наступним чином. На границі поділу мастильного середовища і поверхонь деталей трибоспряження при терті виникають просторові локальні осциляції напружень обумовлені неспільністю деформацій їх спряжених поверхонь. Максимальні їх амплітуди істотно перевищують середнє прикладене навантаження. У поєднанні з деформаціями зсуву локальний тиск в трибоспряженні приводять до виникнення високих локальних моментних напружень, релаксація яких викликає появу ротаційних мод деформації, що відповідальні за формування мезоструктури нижнього рівня – фрагментованої субструктури. Висока міра разорієнтації окремих фрагментів не може бути реалізована за відсутності поворотів елементів деформації [3].

Металографічним аналізом за глибиною поверхневого шару зразків і деталей фіксували фрагментований шар, розмір фрагментів якого значно більше поверхневих. Дана фрагментована структура обумовлена пластичною деформацією при терті. При цьому фіксується незначне зростання середньої щільності дислокацій і деформація локалізується в окремих смугах. Спостерігається кінетика розвитку пластичної деформації і утворення багатшарових приповерхневих структур при терті. Для пластичної деформації поверхнево зміцнених матеріалів в процесі експлуатації з позицій фізичної мезомеханіки матеріалів деталей виявлені наступні особливості:

- при формуванні зміцненого шару і його механічному навантаженні на границі "зміцнений шар + основа деталі" створюються контактні напруження, що мають осцилюючий характер;
- на зміцненій поверхні ускладнене утворення і рух дислокацій та формування деформаційного рельєфу, тобто ускладнені процеси пластичної деформації на мікрорівні в приповерхневому шарі.

На першій стадії пластичної деформації утворюється сильно деформований поверхневий шар і спостерігається поле векторів зсувів у вигляді градієнтної структури. На другій стадії розвитку пластичної деформації в приповерхневому шарі зразка в полі векторів зсувів формується фрагментована структура з характерним розміром мезофрагментів 25 ... 60 мкм.

Зі збільшенням тривалості випробувань на стадії усталеного тертя і зношування розміри мезофрагментів поступово збільшуються, досягаючи значення 150 ... 250 мкм. При цьому пластична деформація супроводжується формуванням великої вихрової мезоструктури, яка в ході подальшого тертя фрагментується на більш дрібні мезооб'єми. Вони зазнають вихрового руху, відділяються один від одного і виносяться із зони тертя у вигляді дискретних частинок зносу.

Розвиток і формування вихрової фрагментованої мезоструктури у зміцненому поверхневому шарі дають можливість управління процесами зношування. В цьому випадку розвиток вихрової мезоструктури в приповерхневому шарі сильно сповільнюється, а тому за час випробувань досягти утворення крупного мезовихору не вдається. Порівняння кривих зношування вихідних і зміцнених зразків (рис. 1) вказує на кореляцію між інтенсивністю зношування і формуванням вихрової фрагментованої мезоструктури.

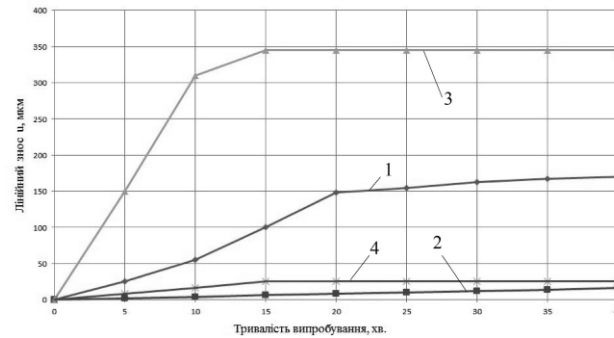


Рис. 1 – Залежність лінійного зносу від тривалості випробувань на машині тертя за схемою "вал - колодка" для трибоспряження "сталь 45-сталь ШХ15":

**1 – вихідні зразки; 2 – зміцнені зразки лазерним боруванням;
за схемою "диск-палець" для трибоспряження "сталь 45 - сталь 9Х":
3 – вихідні зразки; 4 – зміцнені зразки лазерним боруванням**

Виявлено, що зміцнена поверхня зразка блокує зародження в його основі мезовихрової структури, а тому зносостійкість такого матеріалу зростає. В самому зміцненому покритті локалізована пластична деформація розвивається на мезорівні з формуванням лише крупних фрагментів, розворот яких приводить до утворення більш дрібних фрагментів усередині крупних мезовіхрів. В цьому випадку як крупні, так і дрібні фрагменти є зародками частинок зносу.

Таким чином процеси деформації поверхневих шарів деталей при терті розвиваються на мезомасштабному рівні, ним підтверджується припущення Рігні Д.А. [9] про те, що висока міра деформації пов'язана з масопереносом на поверхні деталі і обумовлена ротаційним характером деформації з відносним розворотом фрагментів структури переважно довкола осі, перпендикулярної напрямку тертя і паралельній поверхні ковзання.

З точки зору фізико-мезомеханічного підходу теоретично механізм ротаційної пластичності, пов'язаний з можливістю прослизання ультрадисперсних фрагментів один відносно одного. Він забезпечує в поверхневих шарах зразків і деталей, надзвичайно великі пластичні деформації в процесі тертя й одночасно викликає локалізацію напружень різного знаку в шарах, що пролягають нижче, масштаб яких збігається з масштабом мезовихорів у поверхневих шарах. Це, у свою чергу, призводить до розвитку вихрової мезоструктури, що має інший масштаб. Зазначене також підтверджує той факт, що всі відомі випадки беззносного тертя характеризуються блокуванням мезовихрових структур, що виникають в приповерхневих шарах матеріалів деталей трибоспряжень систем і агрегатів мобільної сільськогосподарської і автотранспортної техніки [10, 11].

З метою підвищення їх зносостійкості та захисту від корозії і ерозії на практиці доцільно використати поверхневе зміцнення потоком енергії і фізичним полем та нанесенням зміцнюючих і захисних покриттів. Розглянутий підхід дає можливість сформулювати вимоги до таких критеріїв зміцнених деталей трибоспряження, як оптимальна товщина зміцненого шару або покриття, геометрія його границі поділу з основою, стану поверхневого шару і основи та проведені експериментальні дослідження:

- товщина зміцнювального покриття на деталі не повинна перевищувати деяку оптимальну величину ($h \leq h_{opt}$), що визначається співвідношенням характеристик поверхневого шару і основи деталей;

- границя поділу між покриттям і основою деталі не може бути геометрично плоскою, оскільки це приводить до формування на ній небезпечних концентраторів напружень і появи квазіперіодичних мікротріщин в покритті;

- основа деталі має бути здатною деформуватися на мікромасштабному рівні, щоб затримувати виникнення мезоконцентраторів напружень, створювати умови для гасіння утворення вихрової мезоструктури або її затримання.

Якщо зміцнений лазерною обробкою поверхневий шар борованої деталі обробити потужним ультразвуком [2], то в ньому створюється ультрадрібнозерниста структура з плавним градієнтним переходом структури та властивостей між покриттям і основою. Одночасно з цим релаксують небезпечні концентратори залишкового напруження у зоні лазерного впливу. Таку обробку можна застосовувати не лише для підвищення ресурсу, але і для підвищення зносостійкості трибоспряжень деталей систем і агрегатів САТТ.

Для спряжень деталей САТТ ефективним є комбіновані технології поверхневого зміцнення, які діють на матеріали деталей потоками енергії і речовини: імпульсне лазерне випромінювання, імпульсні плазмові потоки, поєднані різними способами легування поверхневих шарів. При цьому важливу роль відіграє ефект далекодії, пов'язаний із зростанням щільності дислокацій в поверхневому шарі, який уповільнює утворення в ньому мезовіхрів при експлуатації, в умовах тертя і зношування.

Зазначене являє собою прямі завдання в розробці технологій зміцнення деталей машин із визначення оптимальних технологічних параметрів. В той час вирішення зворотних завдань дозволяє конструювати матеріали з оптимальними характеристиками складу, структури, параметрами зміцнення з позитивними, негативними та комбінованими градієнтами властивостей поверхневого шару, які забезпечують максимальні експлуатаційні характеристики деталей спряжень систем і агрегатів САТТ для даних умов функціонування.

При проведенні комплексних досліджень природи зношування на основі фізико-мезомеханічного підходу визначали структурний та напружено-деформований стан, фазовий склад і властивості модифікованих поверхневих шарів деталей з градієнтними структурами. Виявлено вплив градієнтних структур, сформованих в результаті високоенергетичних дій, на процеси утворення ієрархічних фрактальних структур в приповерхневих шарах на мікро-, мезо- і макромасштабних рівнях в умовах зовнішніх статичних і динамічних навантажень. Отримані результати дозволяють обґрунтувати можливість застосування фізичної мезомеханіки до опису проблеми деградації та зношування поверхонь деталей спряжень при їх контактних діях, які мають місце в умовах тертя ковзання і кочення та абразивного зношування.

Висновки

1. Результати досліджень свідчать, що на основі фізико-мезомеханічного підходу можливе розроблення зміцнюючих технологій нових поколінь, які забезпечують високу стійкість матеріалів до зношування як в абразивному середовищі, так і в трибоспряхнях деталей з робочими, технологічними, в т.ч. і мастильному середовищі.

2. Виявлено, що необхідна зносостійкість досягається у поєднанні з високою конструкційною і утомною міцністю. Одним з прикладів, підтверджуючих зазначене, може слугувати високоміцне лазерне борування.

3. Теоретично обґрунтовано, що при зубчастій границі зміцнюючого покриття поділу з основою, так і дрібнозернистій структурі високі напруження, що здатні викликати формування крупного мезовихора релаксують в результаті мікропластичної деформації і утворюють просторову сітку стохастично розподілених мікротріщин, які не призводять до катастрофічного руйнування твердого покриття.

4. З'ясовано, що для підвищення зносостійкості спряжень деталей САТТ ефективним є модифікування їх поверхневих шарів з заздалегідь сформованими зміцнювальними і захисними покриттями плазовими, іонно-променевими, газотермічними і лазерними методами.

5. Результати досліджень можна використати при оптимізації технологічних параметрів поверхневого зміцнення деталей трибоспряхнь САТТ залежно від вимог, що пред'являються до властивостей їх матеріалів, а також при прогнозуванні їх поведінки в процесі експлуатації.

Література

1. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія / Аулін В. В. – Кіровоград: Лисенко В. Ф., 2014. – 369 с.
2. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. ... доктор. техн. наук: спец. 05.02.04 "Тертя та зношування в машинах" / В.В. Аулін. – Хмельницький: ХНУ, 2014. – 447 с.
3. Владимиров В.И. Проблемы физики трения и изнашивания / В.И. Владимиров // Физика износостойкости поверхностей металлов. – Л.: ФТИ РАН, 1988. – С. 8-41.
4. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами: монографія / Аулін В. В., Тихий А. А. ; за ред. проф. Ауліна В. В.– Кропивницький: Лисенко В. Ф., 2017. – 278 с.
5. Панин В.Е. Физическая мезомеханика разрушения и износа на поверхностях трения твердых тел / В.Е. Панин, П.А. Витязь // Физ.мезомех.-2002. – Т.5. – №1. – С. 5-13.
6. Панин В.Е. Износ в парах трения как задача физической мезомеханики / В.Е. Панин, А.В. Колубаев, А.И. Слосман и др. // Физ. мезомех. – 2000. – Т.3. – № 1. – С. 67-74.
7. Панин В.Е. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др.: В 2 т. Новосибирск: Наука, 1995. – Т.1, 298 с., Т.2, 320 с.
8. Алексеев Н.М. О природе трения деформируемых тел / Н.М. Алексеев, Н.Н. Кузьмин // Физика дефектов поверхностных слоев материалов. – Л.: ФТИ РАН, 1988. – С. 8-34.
9. Ригни Д.А. Физические аспекты трения и изнашивания / Д.А. Ригни // Трибология, исследования и приложения: опыт США и стран СНГ. – М.: Машиностроение, 1993. – С. 52-66.
10. Аулін В.В. Трибофізичне та фізико-технологічне обґрунтування комбінованого функціонально-спрямованого зміцнення та модифікування деталей і робочих органів СГТ / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, А.П. Білик // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – 2014. – Вип. 44. – С. 92-103.
11. Аулін В.В. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, О.В. Кузик, А.В. Гринків, Д.В. Голуб // Монографія – Кропивницький: видавець Лисенко В.Ф., 2016 – 304 с.

Поступила в редакцію 22.12.2017

Aulin V., Lysenko S., Kuzyk O., Zhylova I. **Physico-mesomechanical approach to identifying the nature of wear of mating parts of agricultural and motor transport equipment.**

The essence of the physico-mesomechanical approach to revealing the nature of wear of mating of machine parts is considered. Taking into account the nature of the fragmentation of the surface layer of the parts, the mechanism of its wear is clarified. It is shown, what changes occur in the surface layer, if it is strengthened by the energy flow and coatings, their features indicated. On the example of wear of tribocides according to various schemes, a correlation was found between the wear rate and the formation of the vortex fragmentation of the mesovortex structure. It was found out that the hardened surface of the part blocks the nucleation in its base of the mesovortical structure and thereby contributes to the increase in wear resistance. The basic requirements to the criteria for strengthening the details of tribo-conjugates are formulated. Recommendations for the creation and selection of effective technologies for hardening agricultural and road transport equipment have been developed.

Key words: friction, wear, mesomechanics, surface layer, part, hardening, fragmented structure, meso volume, rotational plasticity, wear resistance.

References

1. Aulin V.V. Fizychni osnovy procesiv i staniv samoorganizacii' v trybotechnichnyh systemah: monografija / Aulin V. V. Kirovograd: Lysenko V. F., 2014. 369 s.
2. Aulin V.V. Trybofizychni osnovy pidvyshhennja znosostijkosti detalej ta robochych organiv sil's'kogospodars'koi' tehniky: dys. ... doktor. tehn. nauk: spec. 05.02.04 "Tertja ta znoshuvannja v mashynah". V.V. Aulin. Hmel'nyckyj: HNU, 2014. 447 s.
3. Vladimirov V.I. Problemy fiziki trenija i iznashivaniya. V.I. Vladimirov. Fizika iznosostijkosti poverhnosti metallov. L.: FTI RAN, 1988. S. 8-41.
4. Aulin V.V. Trybofizychni osnovy pidvyshhennja znosostijkosti i nadijnosti robochych organiv g'runtoobrobnyh mashyn z rizal'nymy elementamy: monografija. Aulin V. V., Tyhyj A. A. ; za red. prof. Aulina V. V. - Kropyvnyckyj: Lysenko V. F., 2017. 278 s.
5. Panin V.E. Fizicheskaja mezomehanika razrusheniya i iznosa na poverhnostjah trenija tverdyh tel. V.E. Panin, P.A. Vitjaz'. Fiz.mezomeh. 2002. T.5. №1. S. 5-13.
6. Panin V.E. Iznos v parah trenija kak zadacha fizicheskoy mezomehaniki. V.E. Panin, A.V. Kolubaev, A.I. Slosman i dr. Fiz. mezomeh. 2000. T.3. № 1. S. 67-74.
7. Panin V.E. Fizicheskaja mezomehanika i komp'juternoe konstruirovanie materialov. V.E. Panin, V.E. Egorushkin, P.V. Makarov i dr.: V 2 t. Novosibirsk: Nauka, 1995. T.1, 298 s., T.2, 320 s.
8. Alekseev N.M. O prirode trenija deformiruemyyh tel. N.M. Alekseev, N.N. Kuz'min. Fizika defektov poverhnostnyh sloev materialov. L.: FTI RAN, 1988. S. 8-34.
9. Rigni D.A. Fizicheskie aspekty trenija i iznashivaniya. D.A. Rigni. Tribologija, issledovanija i prilozhenija: opyt SSHA i stran SNG. M.: Mashinostroenie, 1993. S. 52-66.
10. Aulin V.V. Trybofizychni ta fizyko-tehnologichne obg'runtuvannja kombinovanogo funkcional'no-sprjamovanogo zmicnennja ta modyfikuvannja detalej i robochych organiv SGT. V.V. Aulin, S.V. Lysenko, A.P. Bilyk. Konstruvannja, vyrobnyctvo ta ekspluatacija sil's'kogospodars'kyh mashyn. 2014. Vyp.44. S.92-103.
11. Aulin V.V. Trybofizychni osnovy pidvyshhennja nadijnosti mobil'noi' sil's'kogospodars'koi' ta avtotransportnoi' tehniky tehnologijamy trybotechnichnogo vidnovlennja. V.V. Aulin, S.V. Lysenko, O.V. Kuzyk, A.V. Gryn'kiv, D.V. Golub./ Monografija. Kropyvnyckyj: vydavec' Lysenko V.F., 2016. 304 s.