

- thickness). Bulletin of ISME – Vol.№4. – №16. [Text] – 1961, p. 744 – 751.
13. Справочное руководство по гальванотехнике [Текст]. Под ред. В.И. Лайнера. Пер. с нем. М., «Металургиздат», 1969. – 415с.
 14. Замота Т.Н. Электрохимические основы процесса макроприработки плоских поверхностей трения при ЭХМП(Д) [Текст] // Проблемы трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький національний університет. – 2011., №4, С. 56...61
 15. Замота Т.Н., Кравченко А.П., Аулин В.В. Улучшение макрогеометрии цилиндрических поверхностей трения при электрохимико-механической доводке [Текст] // Политранспортные системы: материалы VII Всерос. науч.- техн. конф., Красноярск, 25-27 ноября 2010 г. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. – С. 235-240.
 16. Замота Т.Н., Аулин В.В. Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения [Текст] // Проблемы трибології. Міжнародний науковий журнал. – Хмельницький національний університет. – 2012., №1. – С. 6-11.

Taras Zamota, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Kirovohrad national technical university, Kirovohrad, Ukraine

Increase of efficiency of running-in of conjugations which are determinating the sevice life of transport vehicles

Application of method of electrochemical - mechanical running-in (ECMR) allows to accelerate of running-in, to correct macrogeometry of details of triboconjugations, to adjust the surfaces of friction. Development of scientific bases of method of ECMR of details with macrogeometrical rejections with possibility of process control is surely the issue of the day.

ECMR of basic connections of details of machines is the high-efficiency process of running-in surfaces, in which except a mechanical action, the process of running-in is accelerated due to electrochemical processes. In the article from positions of substantive provisions of theory of electrochemical processes, theory of wear contactinteraction of the smeared surfaces, hydrodynamic theory of friction, features of electrochemical - mechanical running-in surfaces of details which are ground, analysed conformities to law of running-in of basic conjugations which the resource of machines depends on. Found out possibilities of control process of running-in and conditions of surfaces of details which are ground.

running-in, electrochemical - mechanical running-in, conjugations, resource of machines, transport vehicles

Получено 27.10.15

УДК 621.891

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, О.В. Кузик, доц., канд. техн. наук, В.І. Носуленко, проф., д-р техн. наук

Кіровоградський національний технічний університет, м.Кіровоград, Україна, Aulin52@mail.ru

Вплив властивостей компонентів КМ (КП) на напружено-деформований стан і триботехнічні характеристики деталей СГТ

Розглянуто різновиди контактування трибоелементів (ТЕ), зміцнених КМ (КП), які дозволяють істотно змінювати якість фізичного контакту, величину фактичної площі, здатність поверхневого шару (ПШ) ТЕ до еволюції складу і структури в процесі тертя та зношування. Виявлено ефективне гальмування руху дислокацій гетерогенними структурами КМ (КП), як при низьких, так і при високих температурах, а також рекристалізаційні процеси.

Розглянуто напружений стан матеріалу ТЕ з КМ (КП) при терті. Отримано умову пластичної рівноваги компонентів у вигляді системи рівнянь та формула величини напруження при переході від матеріалу наповнювача до матеріалу матриці та визначено характер деформації, яким вони підлягають.

© В.В. Аулін, О.В. Кузик, В.І. Носуленко, 2015

Отримано вираз для критичного кута нахилу виступу і коефіцієнта тертя та проведена оцінка зміни коефіцієнта тертя. В процесі тертя і зношування ПШ КМ (КП) підлягає пружно-пластичному деформуванню, мало- або багато цикловому руйнуванню під силовим впливом, при протіканні теплових процесів та структурно-фазових перетворень, формуванню залишкових напружень різних знаків, спостерігається сумарний ефект силових, температурних та структурно-фазових залишкових напружень.
композиційний матеріал, наповнювач, контакт, покриття, температура, напружено-деформований стан, поверхневий шар, гетерогенна структура

В.В. Аулин, проф., д-р техн. наук, А.В. Кузык, доц., канд. техн. наук, В.И. Носуленко, проф., д-р техн. наук
Кировоградский национальный технический университет, г.Кировоград, Украина

Влияние свойств компонентов КМ (КП) на напряженно-деформированное состояние и триботехнические характеристики деталей СХТ

Рассмотрены разновидности контактирования трибоэлементов (ТЭ), упрочненных КМ (КП), которые позволяют существенно изменять качество физического контакта, величину фактической площади, способность поверхностного слоя (ПС) ТЭ к эволюции состава и структуры в процессе трения и изнашивания. Выявлено эффективное торможение движения дислокаций гетерогенными структурами КМ (КП), как при низких, так и при высоких температурах, а также рекристаллизационные процессы.

Рассмотрено напряженное состояние материала ТЭ из КМ (КП) при трении. Получено условие пластичного равновесия компонентов в виде системы уравнений и формула величины напряжения при переходе от материала наполнителя к материалу матрицы и определен характер деформации, которым они подлежат.

Получено выражение для критического угла наклона выступления и коэффициента трения и проведена оценка изменения коэффициента трения. В процессе трения и изнашивания ПС КМ (КП) подлжит упруго-пластичному деформированию, мало- или много цикличному разрушению под силовым влиянием, при протекании тепловых процессов и структурно-фазовых превращений, формированию остаточных напряжений разных знаков, наблюдается суммарный эффект силовых, температурных и структурно-фазовых остаточных напряжений.

композиционный материал, наполнитель, контакт, покрытие, температура, напряженно-деформированное состояние, поверхностный слой, гетерогенная структура

Постановка проблеми. Деталі сільськогосподарської техніки (СГТ) працюють в складних умовах знакозмінного циклічного та динамічного навантаження, підвищеної запиленості, взаємодії з активними та агресивними робочими (технологічними) середовищами, а тому не виробляють запланованого ресурсу і 80...90% обсягу їх відмов спричиняють процеси тертя та зношування. Розробка методів та заходів підвищення зносостійкості деталей, спряжень, як триботехнічних систем (ТТС) СГТ, особливо зміцнення композиційними матеріалами (КМ) і композиційними покриттями (КП), потребують виявлення закономірностей взаємодії та механізму їх тертя та зношування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В процесі взаємодії при терті і зношуванні для спряжених поверхонь ТЕ, зміцнених КМ (КП), характерні наступні види контактування: між однойменними однофазними матеріалами; між різнойменними однофазними матеріалами; між однофазним матеріалом та КМ (КП), що складаються із багатокомпонентного твердого розчину; між КМ (КП), що складаються із багатокомпонентного твердого розчину та дво- або багатокомпонентних хімічних сполук [1]; між КМ (КП), що складається з дво- або багатокомпонентних хімічних сполук. Зазначений різновид типів контактів дозволяє істотно змінювати: якість фізичного контакту; величину фактичної площі контакту; здатність поверхневого шару (ПШ) ТЕ до еволюції складу і структури в процесі тертя та зношування; триботехнічні характеристики та властивості; здатність чинити опір утомленому зносу; градієнт опору зсуву та ін. На процес тертя спряжених ТЕ, зміцнених КМ (КП), впливають: розміри, форма і характер взаємного орієнтування наповнювачів; міцність міжкомпонентних границь; агрегатний стан; тип кристалічних ґраток; загальна кількість незалежних площин ковзання в поверхнях стикання; міцність хімічного зв'язку сполук; тріщиностійкість; здатність взаємодіяти між собою та робочим (технологічним)

середовищем; межі текучості та міцності, пружні модулі [2, 3].

Розробку технологічних методів зміцнення здійснювали: Ю.С. Борисов, Д.М. Карпінос, П.С. Кислий, В.В. Кудинов, А.В. Поляченко, К.І. Кравець, І.М. Федорченко, М.Л. Шоршоров, Л. Браутман, Р. Крок, К. Крейдер, А. Хасуї, М.М. Дорожкін, М.І. Черновол, В.В.Аулін, Г.К. Потапов, В.І.Савуляк, Р.С. Сайфуллін, Г.В. Самсонов, Дж.Герланд, N.P.Suh, M.F.Ashby, E.J.Ready та ін. При цьому, велику увагу зосереджено на використанні КМ (КП) для зміцнення, а лазерного випромінювання (ЛВ) для модифікування матеріалів їх складових з утворенням рівноважних та нерівноважних вторинних структур (ВС). Разом з тим недостатньо досліджено різноманіття контактів складових КМ, КП, їх напружений та деформований стан в процесі тертя та зношування, вплив їх характеристик, властивостей та триботехнічних характеристик. Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що не існує єдиної теорії підвищення зносостійкості КМ (КП) та узагальнених методів трибофізичного обґрунтування їх складу і структур

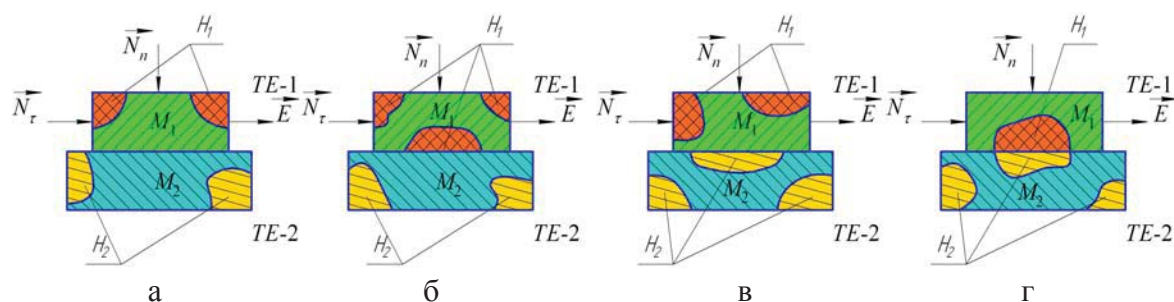
Постановка завдання. Метою даної роботи є виявлення сукупності різноманітних видів контактування спряжень деталей, зміцнених КМ (КП), їх напружено-деформований стан (НДС) та визначення впливу характеристик і властивостей компонентів на властивості і НДС деталі в цілому.

Виклад основного матеріалу. При взаємному контактуванні деталей, зміцнених КМ (КП), як ТЕ з однофазного матеріалу, параметри зони тертя і фізико-хімічні процеси, що відбуваються в них, у порівнянні з контактуванням ТЕ з однофазних матеріалів, виявляються наступні особливості:

- наявність двох або більшої кількості типів контактів;
- залежність числа контактів від фазового складу матеріалу ТЕ, розміру структурних складових, співвідношення коефіцієнту термічного розширення (КТР) фаз (компонентів);
- залежність механічних (межі міцності і текучості, модуля пружності, коефіцієнта Пуассона), теплофізичних і адгезійних характеристик поверхневого шару (ПШ) від співвідношення механічних характеристик фаз, розмірів структурних складових, вмісту, розташування фаз (компонентів) та їх кількості;
- періодичність чергування контактів нерівностей однофазного матеріалу ТЕ з нерівностями структурних складових КМ (КП), розмірів частинок структурних складових, механічних характеристик нерівностей, особливості деформації і руйнування структурних складових у процесі тертя;
- можливість прояву ефекту самозмащування та самоорганізації;
- залежність характеру еволюції складу і структури ПШ від складу і структури КМ (КП) та ін.

Гетерогенна структура КМ (КП) дозволяє ефективно гальмувати рух дислокацій як при низьких, так і при високих температурах та впливати на рекристалізаційні процеси. Діючі при терті навантаження розподіляються по твердим наповнювачам, а в пружно-пластичній матриці відбувається релаксація напружень. Тверді наповнювачі служать своєчинними бар'єрами для рухомих дислокацій і дозволяють різко знизити швидкість пластичної деформації, що може привести до зниження інтенсивності захоплення в контакт "матриця-матриця". Результати експериментальних досліджень показують, що різниця в мікротвердості пружно-пластичної і твердої компонент КМ (КП) повинна складати 3...5 ГПа.

При наявності в пружно-пластичній матриці твердих частинок наповнювача підвищується ймовірність виникнення контактів типу "матриця M_1 -наповнювач H_2 ", "наповнювач H_1 -наповнювач H_2 ", "наповнювач H_1 -матриця M_2 " (рис. 1).



а – "матриця M_1 -матриця M_2 "; б – "наповнювач H_1 -матриця M_2 "; в – "матриця M_1 -наповнювач H_2 "; г – "наповнювач H_1 -наповнювач H_2 "

Рисунок 1 – Схема контактів при терті та зношуванні ТЕ, зміцнених КМ (КП)

Результати досліджень [4, 5] свідчать, що в КМ (КП) наповнювачі не викликають схоплювання, а пружно-пластична матриця забезпечує релаксацію діючих напружень, мінімальну деформацію і зниження ймовірності зародження тріщин утоми. При ковзанні спряження ТЕ в області контактів "матриця M_1 -матриця M_2 " може спостерігатися процес макросхоплювання, який переривається при утворенні контактів "матриця $M_1(M_2)$ -наповнювач $H_2(H_1)$ " або "наповнювач H_1 -наповнювач H_2 ". При цьому структура ПШ не повинна суттєво змінюватися в процесі тертя, але може перебудовуватися, забезпечуючи мінімальний знос при наявності ефекту самоорганізації.

Таким чином, при контактуванні поверхонь ТЕ з КМ (КП) з'являються принципово нові типи контактів, їх характеристики та специфічні ефекти [6, 7]:

- контакти типу "наповнювач-наповнювач" і "наповнювач-матриця", залежні від складу, кількості фаз (компонентів), співвідношення розмірів структурних складових та характеру розташування;
- контактна взаємодія структурних складових одного ТЕ одночасно з кількома складовими іншого ТЕ й поява площ їх перекриття;
- залежність частки площі перекриття компонентів (фаз) від вмісту, розмірів і характеру їх взаємного розташування в ТЕ;
- періодична зміна типів контакту для складових компонентів обох ТЕ в процесі тертя та зношування;
- реалізація ефектів самозмащування, самоорганізації та ін.

При розв'язанні проблеми підвищення зносостійкості деталей і РО СГТ, зміцненням КМ (КП), необхідно враховувати не тільки їх склад, властивості фаз (компонентів), структуру, але і характеристики сукупності контактів ТЕ [8, 9]. Останнє дає можливість класифікувати ТТС наступним чином:

- першого роду: ТЕ-1 і ТЕ-2 з однофазних матеріалів;
- другого роду: ТЕ-1 з однофазного матеріалу, а ТЕ-2, зміцнений КМ (КП);
- третього роду: ТЕ-1 і ТЕ-2, зміцнені КМ (КП) (рис. 1).

Найбільш широкі можливості для керування процесом тертя та зношування за рахунок зміни складу, структури та властивостей матеріалів мають ТТС другого і третього роду. У випадку ТТС другого роду спостерігається наступна комбінація типів контактів: (M_1-M_2) , (M_1-H_{2j}) , де M_1 , M_2 – матеріал ТЕ-1 та матриці ТЕ-2; H_{2j} – матеріал наповнювача КМ (КП) ТЕ-2. До структурних параметрів матеріалів елементів ТТС третього роду можна віднести: розмір, форму і характер розташування ділянок перекриття фаз (компонентів); число ділянок перекриття фаз (компонентів) на одному перетині частинки; розподіл частинок по числу ділянок перекриття на одному перетині частинки; розподіл ділянок перекриття за розміром і площею.

Якщо контактують КМ (КП) зі стохастичним розташуванням наповнювачів, то структурні параметри сукупної поверхні тертя залежать від їх параметрів та

властивостей на спряжених ТЕ ТТС третього роду. При цьому виникає чотири класи контактів: (M_1-M_2) ; (M_1-H_{2j}) ; (M_2-H_{1i}) і $(H_{1i}-H_{2j})$. Оскільки частка площі, зайнятої одним типом контактів, не залежить від ступеню орієнтації однієї поверхні тертя ТЕ відносно іншої, то для її визначення можна використати методи теорії імовірності та теорему про імовірність сукупності незалежних подій [8]. Відношення суми площ локальних ділянок з одним типом контакту до всієї площі поверхні тертя характеризує частка α_i , а сума часток усіх типів контактів на ній дорівнює: $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$. Частки площ

різних контактів ТЕ ТТС третього роду становлять: $\alpha_{(M_1-M_2)}$ – для контакту (M_1-M_2) ; $\alpha_{(H_{1i}-H_{2j})}$ – $(H_{1i}-H_{2j})$; $\alpha_{(M_1-H_{2j})}$ – (M_1-H_{2j}) ; $\alpha_{(H_{1i}-M_2)}$ – $(H_{1i}-M_2)$.

Враховуючи вміст одного з наповнювачів у ТЕ-1 – c_{1i} , а у ТЕ-2 – c_{2j} та відповідно їх матриць – $1 - \sum_{i=1}^n c_{1i}$ та $1 - \sum_{j=1}^m c_{2j}$, частки площ поверхні тертя різних типів контакту дорівнюють:

$$\alpha_{(M_1-M_2)} = \left(1 - \sum_{i=1}^n c_{1i}\right) \left(1 - \sum_{j=1}^m c_{2j}\right); \alpha_{(M_1-H_{2j})} = \left(1 - \sum_{i=1}^n c_{1i}\right) c_{2j}; \alpha_{(H_{1i}-M_2)} = \left(1 - \sum_{j=1}^m c_{2j}\right) c_{1i};$$

$$\alpha_{(H_{1i}-H_{2j})} = c_{1i} c_{2j}. \quad (1)$$

Зазначене було використано для розрахунку параметрів функціонально-спрямованого, диференціального зміцнення робочих поверхонь деталей і РО СГТ і при виявленні умов реалізації ефекту самоорганізації.

Вплив гетерогенності КМ (КП) на характер напруженого стану в зоні контакту можна оцінити за нормальними σ_{M_x} , σ_{M_z} , σ_M , σ_{H_x} , σ_{H_z} , σ_H та дотичними τ_M , τ_H складовими напруження. При цьому умова пластичної рівноваги компонент КМ (КП) має вигляд [10]:

$$\begin{cases} (\sigma_{M_x} - \sigma_{M_y})^2 + 4\tau_M^2 = 4\tau_{M \max}^2; \\ (\sigma_{H_x} - \sigma_{H_y})^2 + 4\tau_H^2 = 4\tau_{H \max}^2. \end{cases} \quad (2)$$

Вважаючи, що напруження на межі поділу компонент, крім σ_{M_x} та σ_{H_x} , однакові:

$$\sigma_{M_y} = \sigma_{H_y} = \sigma; \quad \tau_H = \tau_M = \tau, \quad (3)$$

то враховуючи це в (2), маємо:

$$\begin{cases} (\sigma_{M_x} - \sigma)^2 + 4\tau^2 = 4\tau_{M \max}^2; \\ (\sigma_{H_x} - \sigma)^2 + 4\tau^2 = 4\tau_{H \max}^2. \end{cases} \quad (4)$$

Віднімаючи перше рівняння з другого в системі рівнянь (4), отримуємо:

$$\sigma_{M_x}^2 - \sigma_{H_x}^2 - 2\sigma(\sigma_{M_x} - \sigma_{H_x}) = 4(\tau_{M \max}^2 - \tau_{H \max}^2) = const. \quad (5)$$

Аналіз рівняння (5) свідчить, що у випадку, коли твердість матеріалу матриці більша твердості матеріалу наповнювача, виконується умова: $\tau_{M \max}^2 - \tau_{H \max}^2 < 0$, а в протилежному випадку – $\tau_{M \max}^2 - \tau_{H \max}^2 > 0$. При цьому, в рівнянні (5) маємо співвідношення напружень:

$$\begin{cases} (\sigma_{M_x} - \sigma_{H_x})(\sigma_{M_x} + \sigma_{H_x} - 2\sigma_{M_y}) < 0 \\ (\sigma_{M_x} - \sigma_{H_x})(\sigma_{M_x} + \sigma_{H_x} - 2\sigma_{M_y}) > 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Оскільки при переході через межу поділу компонент КМ (КП) напруження σ_{M_x} змінюється стрибком, то усереднені напруження становлять:

$$\overline{\sigma}_M = (\sigma_{M_x} + \sigma_{M_y})/2; \quad \overline{\sigma}_H = (\sigma_{H_x} + \sigma_{M_y})/2.$$

Змінюється і напрямок максимальних дотичних напружень $\tau_{H_{\max}}$ і $\tau_{M_{\max}}$:

$$\tau_{H_{\max}} \cos 2\beta_H = \tau_{M_{\max}} \cos 2\beta_M, \quad (7)$$

де β_M і β_H – відповідні кути нахилу їх напрямків до межі поділу.

Згідно діаграми Мора [11], в умовах пластичності, для матеріалу матриці матимемо коло з радіусом $\tau_{M_{\max}}$, а для матеріалу наповнювача – з радіусом $\tau_{H_{\max}}$. В умовах рівноваги дотичні і нормальні напруження на межах поділу компонент КМ (КП) мають бути однакові. Пластичний матеріал матриці, що деформується в процесі тертя, зсувається уздовж межі поділу матеріалів ТЕ, внаслідок чого виникають дотичні напруження $\tau_{H_{\max}}$. Лінії ковзання в наповнювачі при цьому повинні йти поблизу межі, паралельно їй, а в матеріалі матриці – під граничним кутом $0,5 \arcsin(\tau_{H_{\max}}/\tau_{M_{\max}})$. У випадку, коли межа поділу матеріалів компонентів знаходиться на середині виступу, то ділянки справа і зліва від неї, внаслідок симетрії, отримають однакову пластичну деформацію. При цьому більш твердий наповнювач вдавлюватиметься у ПШ і для гетерогенної поверхні ТЕ завжди буде надлишок більш м'якого матеріалу, в якому може реалізуватися ефект самоорганізації [12].

Для виявлення характеру деформації компонентів КМ (КП) в процесі тертя та зношування умову пластичної рівноваги подамо в циліндричній системі координат:

$$(\sigma_{r_M} - \sigma_{\alpha_M})^2 + 4\tau_{r_{\theta_M}}^2 = 4\tau_{M_{\max}}^2; \quad (\sigma_{r_H} - \sigma_{\alpha_H})^2 + 4\tau_{r_{\theta_H}}^2 = 4\tau_{H_{\max}}^2. \quad (8)$$

Через те, що на межі поділу компонентів: $\tau_{r_{\theta_M}} = \tau_{r_{\theta_H}} = \tau$, $\sigma_{\alpha_M} = \sigma_{\alpha_H} = \sigma_\alpha$, то при відніманні рівнянь (8), отримаємо:

$$(\sigma_{r_H} - \sigma_{r_M}) \cdot (\sigma_{r_M} + \sigma_{r_H} - 2\sigma_\alpha) = 4\tau_{H_{\max}}^2 - 4\tau_{M_{\max}}^2 = const. \quad (9)$$

Оскільки напруження σ_α стиску завжди від'ємне, то для напруження σ_r маємо: $\sigma_{r_H} = -const/2\sigma_\alpha > 0$, а $\sigma_{r_M} = const/2\sigma_\alpha < 0$. Із зазначеного випливає, що більш твердий матеріал наповнювача підлягає деформації розтягу, а більш м'який матеріал матриці – стиску. Матеріал матриці, витиснутий на поверхню тертя, розмазується по ній, утворюючи тонку плівку з ВС, спостерігаючи процеси і стани самоорганізації. Критичний кут нахилу виступу нерівностей на поверхні тертя при цьому становить:

$$\alpha_{кр} \geq \arctg \frac{\tau_{H_{\max}} - \tau_{M_{\max}} + \sqrt{\tau_{H_{\max}}^2 - \tau_{M_{\max}}^2}}{3\tau_{H_{\max}} + \tau_{M_{\max}} + \sqrt{\tau_{H_{\max}}^2 - \tau_{M_{\max}}^2}},$$

а усереднена величина коефіцієнта тертя дорівнює:

$$\bar{f}_{mp} = \frac{\tau_{M_{\max}} (S_{mp}^M + S_{mp}^H)}{2,57\tau_{M_{\max}} S_{mp}^H + S_{mp}^M [\tau_{H_{\max}} (2,57 + \arccos(\tau_{M_{\max}}/\tau_{H_{\max}})) + \sqrt{\tau_{H_{\max}}^2 - \tau_{M_{\max}}^2}]},$$

де S_{mp}^M , S_{mp}^H – загальні площі ділянок матеріалу матриці і наповнювача на поверхні тертя. У випадку $S_{mp}^M = S_{mp}^H$, маємо:

$$\bar{f}_{mp} = 2 \cdot \left[2,57 + \tau_{M_{\max}}/\tau_{H_{\max}} (2,57 + \arccos(\tau_{M_{\max}}/\tau_{H_{\max}})) + \sqrt{(\tau_{M_{\max}}/\tau_{H_{\max}})^2 - 1} \right]^{-1}. \quad (10)$$

Розрахункові оцінки за формулою (10) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Зміна коефіцієнта тертя f_{mp} КМ (КП) при різних $\tau_{m \max} / \tau_{n \max}$.

$\tau_{m \max} / \tau_{n \max}$	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0
\bar{f}_{mp}	0,00389	0,019	0,038	0,074	0,102	0,141	0,18	0,209	0,273	0,313	0,388

Джерело: розраховано авторами

Аналіз отриманих значень усередненого коефіцієнта тертя ТЕ, зміщеного КМ (КП), свідчить, що його значення у стільки разів менше від відповідної величини для однорідних матеріалів, у скільки разів межа текучості матеріалу наповнювача більше межі текучості матеріалу матриці. Зазначене дає можливість керувати трибофізичними характеристиками, варіюючи властивостями матеріалу компонентів КМ (КП).

При дослідженні властивостей та стану КМ (КП) в процесі їх формування, тертя та зношування вважали, що основа деталей СГТ має однорідні властивості. Шар КМ (КП) умовно поділяли на n підшарів, товщина яких $h_{км(кп)i} \geq d_{n \max}$. Температуру кожного підшару визначали за розв'язком властивого йому диференціального рівняння Фур'є. Для довільної точкової локальної області x_{ijk} КМ (КП) i -го підшару рівняння Фур'є має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t} T_i(z, t) = a_{км(кп)} \frac{\partial^2}{\partial z^2} T_i(z, t), \quad (11)$$

де $a_{км(кп)}$ – коефіцієнт теплопровідності, який визначає теплоінерційність КМ (КП);

t – поточний час процесу;

$T_i(z, t)$ – функція термодинамічної температури.

При цьому приймали наступні припущення: локальна постійність температурного поля; форма та розміри наповнювачів усереднені; склад та властивості матриці КМ (КП) постійні у всьому об'ємі; локальна концентрація наповнювачів в шарі КМ (КП) змінюється випадково; джерелом теплової енергії в зоні тертя є точки контакту між спряженими поверхнями деталей та ін.

При переході від безперервних до дискретних величин використовували різницеві рівняння зміни температури в підшарах КМ (КП), товщиною $h_{км(кп)i}$:

$$\frac{\partial}{\partial z} T(z, t) \approx \left(\frac{\Delta T}{h_{км(кп)i}} \right) = \frac{T_{i,k} - T_{i-1,k}}{h_{км(кп)i}}; \quad \frac{\partial}{\partial z} T_i(z, t) \approx \left(\frac{\Delta T}{h_{км(кп)i}} \right) = \frac{T_{i+1,k} - T_{i,k}}{h_{км(кп)i}}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} \approx \frac{1}{h_{км(кп)i}} \left[\left(\frac{\Delta T}{h_{км(кп)i}} \right)_+ - \left(\frac{\Delta T}{h_{км(кп)i}} \right)_- \right] = \frac{T_{i+1,k} + T_{i-1,k} - 2T_{i,k}}{h_{км(кп)i}^2}, \quad (13)$$

Після проведення перетворень отримуємо рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial t} T_i(z, t) \approx \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t_i}. \quad (14)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (11) і (14), з урахуванням (13), маємо:

$$\frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t_i} = \frac{a_{км(кп)} (T_{i,k+1} - T_{i-1,k})}{h_{км(кп)i}^2} - \frac{2a_{км(кп)}}{h_{км(кп)i}^2} T_{i,k}; \quad a_{км(кп)} = \frac{\lambda_{км(кп)}}{c_{км(кп)} \rho_{км(кп)}}, \quad (15)$$

де $c_{км(кп)}$, $\rho_{км(кп)}$ – відповідно питома теплоємність та густина КМ (КП).

З рівняння (15) отримуємо співвідношення:

$$T_{i,k+1} = \frac{a_{км(кп)} \Delta t_i}{h_{км(кп)i}^2} (T_{i+1,k} + T_{i-1,k}) - \frac{2a_{км(кп)} \Delta t_i}{h_{км(кп)i}^2} T_{i,k} + T_{i,k}, \quad (16)$$

яке, при введенні позначення $F_{oz} = a_{км(кп)} \Delta t_i / h_{км(кп)}^2$, набуває вигляду:

$$T_{i,k+1} = F_{oz} (T_{i+1,k} + T_{i-1,k}) + (1 - 2F_{oz}) T_{i,k}. \quad (17)$$

Аналіз рівняння (17) свідчить, що при $F_{oz} \leq 0,5$ воно має сенс і у тривимірному розгляді задачі умовою рівноваги є: $(F_{ox} + F_{oy} + F_{oz}) \leq 0,5$. Оскільки досліджувана просторова область КМ (КП) має N елементарних локальних областей, то її математична модель складається з N рівнянь типу (17).

Визначення полів температур і напружень на ПК проводили методом скінчених елементів за допомогою пакету COSMOSWorks, інтегрованого в CAD-систему SolidWorks [13], який дозволяє врахувати умови формування та експлуатації КМ (КП) з сукупністю істотних факторів. При цьому у навантаженому КМ (КП), нанесеному на поверхню деталі або РО СГТ, виділяються характерні області за кольором з різною величиною температури та напруження.

Послідовно досліджуючи кожен локальну область, отримуємо загальну картину розподілу температури (рис. 2).

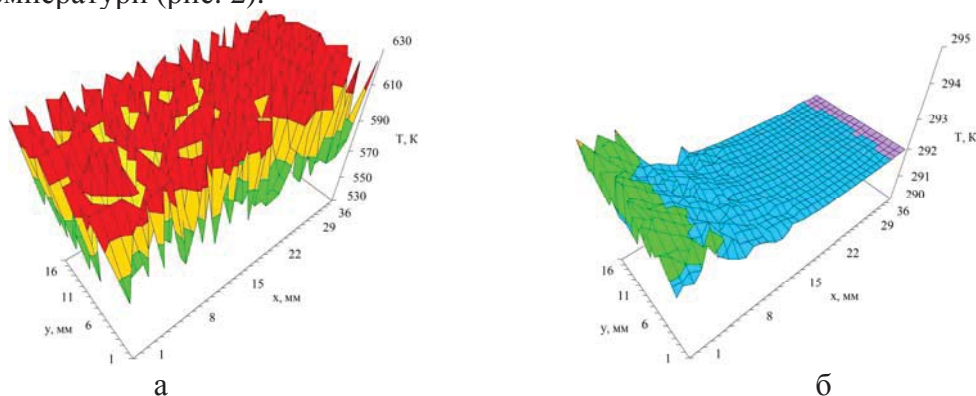


Рисунок 2 – Характерні поля температур в ПШ КМ (КП) з наповнювачем Cr_3C_2 (а) та верхньому шарі основи (б)

Джерело: отримано авторами

Можна бачити, що на НДС елементарного об'єму КМ (КП) в підшарі впливає неоднорідність теплового розширення матриці та наповнювачів:

$$\begin{cases} \varepsilon_{xi} = E_{км(кп)}^{-1} [\sigma_{xi} - \mu_{км(кп)} (\sigma_{yi} + \sigma_{zi})]; & \gamma_{xyi} = \tau_{xyi} / G_{км(кп)}; \\ \varepsilon_{yi} = E_{км(кп)}^{-1} [\sigma_{yi} - \mu_{км(кп)} (\sigma_{zi} + \sigma_{xi})]; & \gamma_{yzi} = \tau_{yzi} / G_{км(кп)}; \\ \varepsilon_{zi} = E_{км(кп)}^{-1} [\sigma_{zi} - \mu_{км(кп)} (\sigma_{xi} + \sigma_{yi})]; & \gamma_{zxi} = \tau_{zxi} / G_{км(кп)}, \end{cases} \quad (18)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження в напрямках ОХ, ОУ, ОZ;

$\tau_{xyi}, \tau_{yzi}, \tau_{zxi}$ – дотичні напруження в локальних областях площин ХОУ, YOZ, ZOX;

$\varepsilon_{xi}, \varepsilon_{yi}, \varepsilon_{zi}$ – відносні деформації в напрямках ОХ, ОУ, ОZ;

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – відносний зсув в локальних областях (площин) ХОУ, YOZ, ZOX;

$E_{км(кп)}, \mu_{км(кп)}$ – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу КМ (КП);

$G_{км(кп)} = E_{км(кп)} / 2(1 - \mu_{км(кп)})$ – модуль зсуву.

З урахуванням об'ємного вмісту наповнювача c_n , маємо:

$$\begin{cases} E_{км(кп)} = E_m (1 - c_n) + E_n c_n; & G_{км(кп)} = G_m (1 - c_n) + G_n c_n; \\ \mu_{км(кп)} = \mu_m (1 - c_n) + \mu_n c_n; & \alpha_{км(кп)} = \alpha_m (1 - c_n) + \alpha_n c_n, \end{cases} \quad (19)$$

де $E_m, G_m, \alpha_m, \mu_m; E_n, G_n, \alpha_n, \mu_n$ – модулі пружності та зсуву, коефіцієнти теплового розширення та Пуассона матеріалу матриці та наповнювача.

Враховуючи різницю температур сусідніх локальних областей КМ (КП) в підшарі, система рівнянь (18) набуває вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\text{км(кп)}} \Delta T_{xi} = E_{\text{км(кп)}}^{-1} [\sigma_{xi} - \mu_{\text{км(кп)}} (\sigma_{yi} + \sigma_{zi})]; \quad \alpha_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{xi} - \Delta T_{yi}) = \tau_{xyi} / G_{\text{км(кп)}}; \\ \alpha_{\text{км(кп)}} \Delta T_{yi} = E_{\text{км(кп)}}^{-1} [\sigma_{yi} - \mu_{\text{км(кп)}} (\sigma_{zi} + \sigma_{xi})]; \quad \alpha_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{yi} - \Delta T_{zi}) = \tau_{yzi} / G_{\text{км(кп)}}; \\ \alpha_{\text{км(кп)}} \Delta T_{zi} = E_{\text{км(кп)}}^{-1} [\sigma_{zi} - \mu_{\text{км(кп)}} (\sigma_{xi} + \sigma_{yi})]; \quad \alpha_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{zi} - \Delta T_{xi}) = \tau_{zxi} / G_{\text{км(кп)}}. \end{array} \right. \quad (20)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (20) відносно складових напружень, маємо:

– нормальні напруження:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xi} = E_{\text{км(кп)}} \alpha_{\text{км(кп)}} \frac{(1 - \mu_{\text{км(кп)}}) \Delta T_{xi} + \mu_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{yi} + \Delta T_{zi})}{1 - \mu_{\text{км(кп)}} - 2\mu_{\text{км(кп)}}^2}; \\ \sigma_{yi} = E_{\text{км(кп)}} \alpha_{\text{км(кп)}} \frac{(1 - \mu_{\text{км(кп)}}) \Delta T_{yi} + \mu_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{zi} + \Delta T_{xi})}{1 - \mu_{\text{км(кп)}} - 2\mu_{\text{км(кп)}}^2}; \\ \sigma_{zi} = E_{\text{км(кп)}} \alpha_{\text{км(кп)}} \frac{(1 - \mu_{\text{км(кп)}}) \Delta T_{zi} + \mu_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{xi} + \Delta T_{yi})}{1 - \mu_{\text{км(кп)}} - 2\mu_{\text{км(кп)}}^2}, \end{array} \right. \quad (21)$$

– дотичні напруження:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{xyi} = G_{\text{км(кп)}} \alpha_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{xi} - \Delta T_{yi}); \\ \tau_{yzi} = G_{\text{км(кп)}} \alpha_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{yi} - \Delta T_{zi}); \\ \tau_{zxi} = G_{\text{км(кп)}} \alpha_{\text{км(кп)}} (\Delta T_{zi} - \Delta T_{xi}). \end{array} \right. \quad (22)$$

При цьому еквівалентне напруження в локальній області КМ (КП) підшару дорівнює:

$$\sigma_{ei} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xi} - \sigma_{yi})^2 + (\sigma_{yi} - \sigma_{zi})^2 + (\sigma_{zi} - \sigma_{xi})^2 + 6(\tau_{xyi}^2 + \tau_{yzi}^2 + \tau_{zxi}^2)}, \quad (23)$$

а в ПШ КМ (КП) – $\sigma_{ш} = \sum_{i=1}^n \sigma_{ei}$.

Теоретичні обґрунтування підтвержені результатами експериментальних досліджень показали, що на неоднорідність полів температури, напружень та деформацій впливають: параметри структури, фізико-механічні властивості компонентів, технологічні параметри формування КМ (КП) та параметри навантаження тертям.

Висновки.

1. Розглянуто характерні різновиди контактування ТЕ, зміцнених КМ (КП), які дозволяють істотно змінювати якість фізичного контакту, величину фактичної площі, здатність ПШ ТЕ до еволюції складу і структури в процесі тертя та зношування, триботехнічні характеристики та властивості, здатність чинити опір утомленому зносу та ін. При взаємному контактуванні спряжених поверхонь ТЕ, зміцнених КМ (КП), з'являються принципово нові контакти, специфічні їх характеристики та ефекти.

2. Гетерогенна структура КМ (КП) ефективно гальмує рух дислокацій як при низьких, так і при високих температурах, а також рекристалізаційні процеси. Діючі при терті навантаження розподіляються по твердим наповнювачам, які служать своєчинним бар'єрами для рухомих дислокацій і знижують швидкість пластичної деформації матриці, що приводить до зниження інтенсивності захоплення в контакт "матриця-матриця" і в пружно-пластичній матриці відбувається релаксація діючих напружень, мінімальна деформація і зниження ймовірності зародження тріщин утоми.

3. Розглянуто напружений стан матеріалу ТЕ з КМ (КП) при терті. Отримано умову пластичної рівноваги компонентів у вигляді системи рівнянь та формула величини напруження при переході від матеріалу наповнювача до матеріалу матриці та визначено характер деформації яким вони підлягають.

4. Враховуючи максимальні дотичні напруження матриці і наповнювача, отримано вираз для критичного кута нахилу виступу і коефіцієнта тертя та проведена оцінка зміни коефіцієнта тертя.

5. Виявлено, що в процесі тертя і зношування ПШ КМ (КП) підлягає пружно-пластичному деформуванню, мало- або багато цикловому руйнуванню під силовим впливом, при протіканні теплових процесів та структурно-фазових перетворень, формуванню залишкових напружень різних знаків, спостерігається сумарний ефект силових, температурних та структурно-фазових залишкових напружень.

Список літератури

1. Белый А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоїв [Текст] / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
2. Белоусов В.Я. Долговечность деталей машин с композиционными материалами [Текст] / В.Я. Белоусов. – Львів: Вища школа, 1984. – 180 с.
3. Бородин И.Н. Упрочнение деталей композиционными покрытиями [Текст] / И.Н. Бородин. – М.: Машиностроение, 1982. – 141 с.
4. Аулін В.В. Абразивна зносостійкість лазерно-модифікованих композиційних покриттів / В.В.Аулін // Зб. наук. праць КДТУ "Техніка в сільськогосп. виробн., галузеве машинобуд., автоматизація. – Вип. 12. – 2003. – С.219-223.
5. Аулін В.В. Вплив на зносостійкість композиційних матеріалів процесів, що протікають на межі їх складових [Текст] / В.В. Аулін, Ф.Й. Златопольский, В.М. Бобрицький // Инженерия поверхности и реновация изделий. М-лы 4-й междунар. научн.-техн. конф., 24-26 мая 2005, г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2005. – С.289-291.
6. Иваночкин П.Г. Контактные задачи для узлов трения с двухслойными композициями триботехнического назначения: автореф. дисс. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук.: спец.01.02.04 "Механика деформируемого твердого тела", 05.02.04 "Трения и износ в машинах"/ П.Г. Иваночкин. – Ростов-на Дону, 2009. – 38с.
7. Черновол М.І. Фізичні основи створення композиційних матеріалів і покриттів триботехнічного призначення [Текст] / М.І. Черновол, В.В. Аулін // Вісник інженерної академії України.– №2-3. – 2006. – С. 80-87.
8. Аулін В.В. Вплив характеристик компонентів контактуючих композиційних матеріалів і покриттів на параметри та властивості зони тертя [Текст] / В.В. Аулін // Проблеми трибології (Problems of tribology). – Хмельницький: ХНУ. – 2006. – №4 (42) – С. 110-112.
9. Аулін В.В. Методологія розв'язання проблеми підвищення зносостійкості деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки [Текст] / В.В. Аулін // Вісник ЖНАЕУ: наук.-теор. зб.– випуск № 2 (45), т.4, ч.ІІ – 2014. – С. 80-91.
10. Аулін В.В. Поле напружень в композиційному матеріалі та композиційному покритті в умовах тертя ковзання [Текст] / В.В. Аулін // Зб. наук. праць ЛНАУ. Серія: Технічні науки. – Луганськ: ЛНАУ, 2006. – №.65(88). – С.13-20.
11. Бондаренко В.П. Триботехнические композиты с высокомолекулярными наполнителями / В.П. Бондаренко. – К.: Наук. думка, 1987. – 232 с.
12. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах [Текст] : монографія / В.В. Аулін. – Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф., 2014. – 370 с.
13. Аулін В.В. Комп'ютерне моделювання полів температур та напружень в композиційних матеріалах та покриттях при їх формуванні, терті та зношуванні [Текст] / В.В. Аулін, В.М. Бобрицький // Зб. наук. праць КНТУ/ Техніка в с/г виробництві, галузеве машинобуд., автоматизація, вип. 27. – Кіровоград, 2014. – С.235-245.

Viktor Aulin, Prof., DSc., Oleksandr Kuzyk, Assos. Prof., PhD tech. sci., Victor Nosulenko, Prof., DSc.

Kirovohrad national technical university, Kirovohrad, Ukraine

Influence of properties of components of CM(CC) on the tensely-deformed state and tribotechnical descriptions of details of agricultural technique (AT)

The varieties of contact of трибоелементів are considered tribo-element (TE), fortified composite

material (CM) composition coating (CC), that allow substantially to change quality of physical contact, size of actual area, ability of superficial layer (SL) TE to the evolution of composition and structure in the process of friction and wear. The effective braking of motion of distributions the heterogeneous structures of CM(CC) is educed, both at subzero and at high temperatures, and also recrystallizations processes. The operating at a friction loading is distributed on hard fillers, that serve as opportune, barriers to movable distributions and reduce speed of flowage of matrix, that brings to the decline of intensity grasping over in a contact "matrix-matrix" and in a resiliently-plastic matrix there is relaxation of net voltages, minimum deformation and decline of probability of origin of cracks of tiredness.

The tense state of material is considered TE of CM(CC) at a friction. The condition of plastic equilibrium of components as a system of equalizations and formula of size of tension are got in transition from material of filler to material of matrix and character of deformation is certain they are subject that.

Expression for the critical angle of slope of performance and coefficient of friction and conducted estimation of change of coefficient of friction are got. In the process of friction and wear of SL CM(CC) subject to resiliently-plastic deformation, small- or much to cyclic destruction under power influence, at flowing of thermal processes and structurally- phase transformations, to forming of remaining tensions of different signs, there is a total effect of power, temperature and structurally- phase remaining tensions.

composition material, filler, contact, coverage, temperature, tensely-deformed state, superficial layer, heterogeneous structure motor oil, vehicle, engine, non-stationary conditions, exploitation, operating time, additives

Одержано 17.11.15

УДК 631.33

К.В. Васильковська, канд. техн. наук

*Кіровоградський національний технічний університет, м. Кіровоград, Україна,
vasilkovskakv@ukr.net*

Точний висів просапних культур – першочерговий крок у програмуванні майбутнього врожаю

Визначено, що першочерговим кроком у програмуванні майбутнього врожаю просапних культур є точний висів насіння. Запропоновано конструкцію нового пневмомеханічного висівного апарату для точного висіву насіння просапних культур з периферійним розташуванням комірок на висівному диску та пасивним пристроєм для видалення зайвого насіння відцентровим способом. Проведені дослідження запропонованого висівного апарату в ґрунтовому каналі, які підтвердили його високу продуктивність і якість висіву.

програмування врожаю, точний висів, насіння, пневмомеханічний висівний апарат

Е.В. Васильковская, канд. техн. наук

Кировоградский национальный технический университет, г.Кировоград, Украина

Точный высеv пропашных культур – первоочередной шаг в программировании будущего урожая

Определено, что первоочередным шагом в программировании будущего урожая пропашных культур является точный посев семян. Предложена конструкция нового пневмомеханического высевающего аппарата для точного посева семян пропашных культур с периферийным расположением ячеек на высевающем диске и пассивным устройством для удаления лишних семян центробежным способом. Проведены исследования предложенного высевающего аппарата в почвенном канале, которые подтвердили его высокую производительность и качество посева.

программирование урожая, точный посев, семена, пневмомеханический высевающий аппарат