

ТЕРТЯ ТА ЗНОШУВАННЯ В МАШИНАХ

УДК 531.43:621.891

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1\(32\).103-113](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).103-113)

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., **В.В. Яцун**, доц., канд. техн. наук, **І.О. Скриннік**, доц., канд. техн. наук

*Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: AulinVV@gmail.com*

А.Б. Гупка, канд. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: gupkab@gmail.com

Напружено-деформований стан поверхневого шару деталей при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення

З теоретичної точки зору розглянуто вплив триботехнологій припрацювання і відновлення на формування напружено-деформованого стану поверхневих шарів спряжених деталей систем і агрегатів транспортних засобів. Визначено, що переважна більшість їх трибоспряжень працюють в умовах пластичного насиченого або ненасиченого контактів. Модифікований поверхневий шар сформований реалізацією триботехнологій припрацювання і відновлення спряжених деталей розглядали як конструктивно-ортотропні оболонки. Враховуючи систему діючих сил і моментів сил показано, що вони задовольняють рівнянням рівноваги, що характерні для тонких однорідних оболонок. Компоненти напруження і деформації поверхневого шару отримані відповідно до узагальненого закону Гука, з урахуванням гіпотези Кірхгофа-Ляве. Ці вирази можна використовувати для оцінки напружено-деформованого стану спряжених поверхонь деталей при їх модифікуванні або впливі в процесі реалізації триботехнологій припрацювання та відновлення для підвищення їх ресурсу.

напружено-деформований стан, триботехнічне припрацювання, триботехнічне відновлення, моделювання, поверхневий шар, напруження

В.В. Аулін, проф., д-р техн. наук, **С.В. Лисенко**, доц., канд. техн. наук, **А.В. Гриньків**, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., **В.В. Яцун**, доц., канд. техн. наук, **І.А. Скриннік**, доц., канд. техн. наук

Центральнoукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Україна

А.Б. Гупка, канд. техн. наук

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, г. Тернопіль, Україна

Напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя деталей при реализации технологий триботехнической приработки и восстановления

С теоретической точки зрения рассмотрено влияние триботехнологий приработки и восстановления на формирование напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев сопряженных деталей систем и агрегатов транспортных средств. Определено, что подавляющее большинство их трибоспряжений работают в условиях пластического насыщенного или ненасыщенного контактов. Модифицированный поверхностный слой сформированный реализацией триботехнологий приработки и восстановления сопряженных деталей рассматривали как конструктивно-ортотропные оболочки. Учитывая систему действующих сил и моментов сил показано, что они удовлетворяют уравнениям равновесия, характерным для тонких однородных оболочек. Компоненты напряжения и деформации поверхностного слоя полученные в соответствии с обобщенного закона Гука, с учетом гипотезы Кирхгофа-Ляве. Эти выражения можно использовать для оценки напряженно-деформированного состояния сопряженных поверхностей деталей при их модифицировании или воздействии в процессе реализации триботехнологий приработки и восстановления для повышения их ресурса.

напряженно-деформированное состояние, триботехническая приработка, триботехническое восстановление, моделирование, поверхностный слой, напряжение

© В.В. Аулін, С.В. Лисенко, А.В. Гриньків, В.В. Яцун, І.О. Скриннік, А.Б. Гупка, 2019

Постановка проблеми. Подовження ресурсу та підвищення ефективності експлуатаційної надійності трибоспрямижень деталей систем і агрегатів транспортної техніки модифікуванням їх елементів різними технологіями не викликає сумнівів. В останній час широке розповсюдження отримали методи інженерінгу поверхонь деталей та подовження ресурсу їх спряжень за допомогою триботехнологій припрацювання (ТТП) і відновлення (ТТВ) [1, 2]. Однак недостатність обсягу інформації про ТТП і ТТВ, частково внаслідок їх комерційної закритості, а частково й через її відсутність, заважає широкому застосуванню таких ефективних та перспективних технологій на транспорті. Тому розкриття фізичної сутності процесів, що відбуваються в поверхневих шарах матеріалів деталей і на поверхнях тертя сформованих покриттів з використанням композиційних мастильних середовищ, є актуальним науковим завданням. Поряд з експериментальними дослідженнями процесів припрацювання і відновлення робочих поверхонь спряжених деталей [3] перспективними є методи інженерно-математичного моделювання характеристик і властивостей сформованих поверхневих шарів їх матеріалів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо [4-7], що при реалізації ТТП і ТТВ в трибоспрямиженнях деталей, утворюються поверхневі шари специфічної структури, змінюється їх склад та властивості. Склад залежить передусім від застосованої композиційної оливи. При використанні геомодифікаторів завжди формується металокерамічне покриття [8]. Передумови створення концептуальної моделі напружено-деформованого стану (НДС) поверхневого шару матеріалу [9], а також покриття сформованого на деталях трибоспрямижень проаналізовані в роботах [1,10,11].

Математичній постановці завдань визначення характеристик контакту силової взаємодії спряжених пружних поверхонь зразків і деталей присвячені роботи [12]. У роботі [12] розвинено метод інженерінгу для вирішення контактних завдань, що приводять до одержання наближених аналітичних виразів визначення параметрів контакту. В роботі [13], на основі цього методу були отримані вирази для взаємодії циліндричного штампу із пружним двошаровим півпростором. Моделюванню контакту сферичних поверхонь із урахуванням шорсткості, хвилястості, макровідхилень і фізико-механічних властивостей поверхневого шару присвячена роботи [1, 11].

На сьогодні відома достатньо велика кількість моделей і зроблені обчислення характеристик контакту для поверхонь різних конфігурацій. Недоліком запропонованих методик оцінки характеристик покриттів є те, що параметри їх стану враховуються не повною мірою. Відомо, що матеріали, що працюють в умовах контактної взаємодії й тертя ковзання, мають здатність трансформувати вихідну структуру. Установлено, що при роботі важко навантажених трибоспрямижень деталей при контактних навантаженнях $\sigma = 700 \dots 1800$ МПа в процесі припрацювання має місце збільшення спотворень кристалічної структури та щільності дислокацій, викликані великим ступенем деформації мікропрофілю [14].

Перехід від вихідного стану поверхні спряжених деталей до експлуатаційного й наступного руйнування супроводжується складними фізико-механічними й структурними перетвореннями в поверхневих шарах матеріалу деталей [15], які доцільно враховувати в розрахунках параметрів контакту, оцінках ресурсу та рівня надійності. Тому розгляд напружено-деформованого стану (НДС) поверхневого шару матеріалу деталей може базуватися на підході, що враховує основну реологічну відмінність у порівнянні із класичним тертям. Найбільш застосовним підходом при аналізі процесів і станів самоорганізації матеріалів деталей [16] є інформаційно-статистичний підхід, який, у свою чергу, не може бути проведений без аналізу діючих

на них сил і моментів.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка підходу фізико-математичного моделювання напружено-деформованого стану поверхневого шару деталей при реалізації ТТП і ТТВ з використанням геомодифікаторів в композиційній оливі та побудова концептуальної моделі на основі аналізу властивостей поверхневих шарів матеріалів деталей спряжень систем і агрегатів засобів транспорту.

Виклад основного матеріалу. В процесі експлуатації з реалізацією ТТП і ТТВ матеріали спряжених деталей мають складний напружено-деформований стан, кожний з яких визначається системою "основний матеріал-поверхневий шар (покриття)" [14,17]. На поверхневий шар деталі одночасно діє цілий комплекс напружень: дотичні напруження деформацій зсуву і кручення, а також нормальні напруження деформацій розтягу і стиску та поздовжнього вигину. Реальну картину НДС можна оцінити по величині еквівалентних напружень, відомих за IV енергетичною гіпотезою міцності С.П. Тимошенко [18]:

$$\sigma_{екв.IV} = \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2 + 3\tau_{\Sigma}^2}, \quad (1)$$

де σ_{Σ} , τ_{Σ} – сумарні нормальні та дотичні напруження в небезпечному перерізі поверхневого шару деталі. Небезпечним перерізом буде перетин, де діє максимальне контактне напруження q_{max} .

Для визначення величини σ_{Σ} використовуємо вираз для оцінки нормальних усереднених напружень у зонах контакту абсолютно твердої кулі із плоскою поверхнею пружно-деформованого матеріалу, тобто об'ємну модель Вінклера [19]:

$$\sigma_n = \frac{0,42E_{зв}}{(1-\mu_{зв})} \sqrt{\frac{h_{деф}}{R_k}}, \quad (2)$$

де R_k – радіус кулі-індентора;

$\mu_{зв}$, $E_{зв}$ – зведені коефіцієнт Пуассона та модуля пружності матеріалу поверхневого шару;

$h_{деф}$ – товщина зони деформованого шару.

В процесі експлуатації поверхневий шар деталі, сформований ТТП або ТТВ, перебуває в умовах пластичності й повзучості. Оскільки він створюється в умовах нестационарного зовнішнього навантаження, то є сенс вважати його повзучість динамічною. Розрахунок на динамічну повзучість зводиться до визначення довговічності зміцнення деталей ТТП або ТТВ при відомих або заданих наступних параметрах: температурі, еквівалентному напруженні й граничній деформації.

Довговічність поверхневого шару сформованого ТТП або ТТВ, що відповідає характерному напруженню $\sigma_{екв}$ або σ_{-1} , можна встановити, задаючись граничною відносною деформацією ε , і використовуючи криву Велера для даної температури. Аналогічно чином можливе вирішення й зворотного завдання – визначення граничних напружень по заданій довговічності і граничній відносній деформації ε .

Відомо, що при пружних деформаціях у зонах контакту циклічна довговічність до руйнування матеріалу поверхневого шару визначається моделлю Вінклера:

$$n = \left(\sigma_{\varepsilon} / \sigma_{p-c}\right)^m, \quad (3)$$

де n – число циклів;

σ_{ε} – межа міцності;

σ_{p-c} – напруження розтягу-стиску, викликані силами тертя;

m – показник степеня у рівнянні Велера, залежний від фізико-механічних

властивостей матеріалу деталей. Для високолегованих жаростійких конструкційних сталей цей параметр дорівнює $m = 4$ [19].

У випадку пластичного ненасиченого контакту багаторазове пластичне деформування сформованого шару та покриттів викликає зношування від малоциклової втоми. У цьому випадку число циклів n до руйнування дорівнює:

$$n = (2\varepsilon_g / \varepsilon_t)^m, \quad (4)$$

де ε_g – деформація, що відповідає межі міцності σ_g ;

ε_t – деформація, що виникає під дією сил тертя.

Установлено, що $\varepsilon_t = 0,025 f_{mp} \operatorname{tg} \theta$, де f_{mp} – коефіцієнт тертя; θ – кут нахилу мікронерівності до площини її основи. При пружному ненасиченому контакті дотичне напруження дорівнює:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta p_{\max}, \quad (5)$$

де τ_0 й β – фрикційні характеристики, що залежать від умов роботи трибоспрямижень деталей. При цьому основні триботехнічні характеристики коефіцієнт тертя f_{mp} , інтенсивність зношування I_u , питомий тиск p_{\max} у зоні контакту, враховуючи фізико-механічні параметри та НДС, можна оцінити за формулами:

$$f_{mp} = 1,4 \left[\frac{\tau_0 (1 - \mu_{3g}^2)}{E_{3g}} \right] + \beta; \quad I_u = \frac{1,5}{n\alpha} \left(\frac{h}{R} \right)^{1/2}; \quad p_{\max} = 1,66 \left[\frac{\tau_0 E_{3g}}{(1 - \mu_{3g}^2)\alpha} \right]^{1/2}. \quad (6)$$

де α – коефіцієнт, що характеризує напружений і кінематичний стан матеріалу деталі у зоні контакту. Для пружного ненасиченого контакту рекомендується вважати $\alpha \approx 0,75$, а для насиченого – $\alpha \approx 0,88$ [11].

Зазначимо, що переважна більшість трибоспрямижень деталей систем і агрегатів засобів транспорту працюють в умовах пластичного насиченого або ненасиченого контактів. Насиченим є контакт двох шорстких спряжених поверхонь, при якому число контактуючих нерівностей дорівнює числу нерівностей, розташованих на контурній площі контакту. Такий вид контакту характерний для умов ковзання шорсткої поверхні матеріалу деталі з великою твердістю по поверхні матеріалу спряженої деталі, що має меншу шорсткість і меншу твердість. Ненасичений контакт виникає, коли число контактів нерівностей менше числа нерівностей, розташованих на контурній площі контакту. Ненасичений контакт виникає при терті деталей, твердість матеріалів яких практично не відрізняється [1,11].

Якщо у виразі (3) $n \rightarrow +\infty$, що має місце при реалізації ТТП і ТТВ, то при цьому матеріал поверхневого шару деталі в експлуатації поводить себе як квазів'язкий, $\sigma_g \rightarrow 0$. Можливе також одночасне прагнення $m \rightarrow +\infty$. В таких умовах матеріал сформованих поверхневих шарів деталей переходить із пружної області в область динамічної повзучості.

Виходячи з гіпотези Кірхгофа-Ляве [20], складні просторові завдання аналізу НДС матеріалу поверхневого шару деталей, як конструктивно-ортотропної системи, можна звести до зведеної поверхні двовимірними процесами деформування.

Розглянемо модифікованій поверхневій шари сформовані на деталях реалізацією ТТП або шари покриття – при ТТВ, як конструктивно-ортотропні оболонки. При цьому поверхні зведення визначаються параметром z_0 (рис. 1).

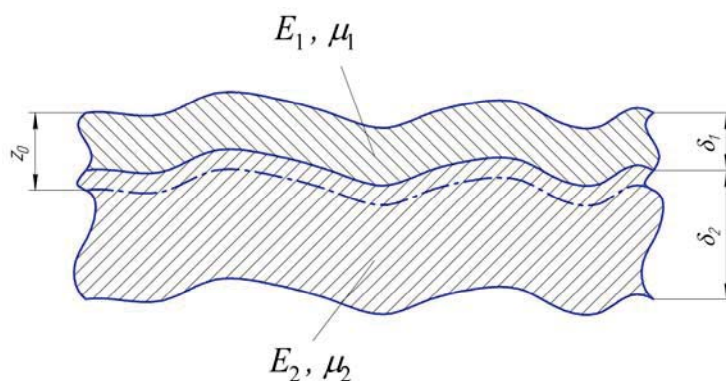


Рисунок 1 – Схема поверхневого шару деталі для визначення параметру z_0 : E_1, E_2 ; μ_1, μ_2 – модулі пружності і стала Пуассона для двох підшарів; δ_1, δ_2 – товщини першого та другого підшарів

Джерело: розроблено авторами

Виходячи з роботи [11], параметр z_0 оцінюється за формулою:

$$z_0 = \frac{E_1 \delta_1^2 + 2E_2 \delta_1 \delta_2 + E_2 \delta_2^2}{2(E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)}. \quad (7)$$

Для поверхонь зведення можливі наступні співвідношення:

- для верхньої частини шару: $E_1 \delta_1^2 > E_2 \delta_2^2$;
- для нижньої частини шару: $E_1 \delta_1^2 < E_2 \delta_2^2$;
- для поверхні поділу фаз: $E_1 \delta_1^2 = E_2 \delta_2^2$.

Зазначене визначає фізичний зміст умови зведення Вілларсо. Якщо положення точки на поверхні зведення визначає ортогональна система криволінійних координат α_1, α_2 , а координатні лінії збігаються з лініями кривизни цієї поверхні, то розташування їх по товщині визначатиметься відстанню z від поверхні зведення. При цьому відстань z буде позитивною $z > 0$, якщо точки розташовані з боку зовнішньої нормалі і негативною $z < 0$ – у протилежному випадку.

Відносні деформації розтягу й зсув поверхні зведення позначимо через $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \omega = 2\varepsilon_3$, а зміни кривизни і деформації кручення – через ξ_1, ξ_2, ξ_3 . Ці параметри повністю визначають деформований стан поверхневого шару як двошарової оболонки й подаються через компоненти переміщення уздовж координатних ліній S_1, S_2 і по зовнішній нормалі S_3 .

Напружений стан оболонки, що виникає в нормальних перетинах, описується цілком певними функціями координати z незалежно від структури оболонки поверхневого шару по товщині. Підсумовуючи напруження по товщині оболонки, систему напружень можна замінити статично еквівалентною системою сил і моментів $\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{S}, \vec{G}_1, \vec{G}_2, \vec{M}_1, \vec{M}_2$, розрахунок оболонки зводиться до розв'язання завдання дослідження станів рівноваги й деформування зведеної поверхні (рис. 2).

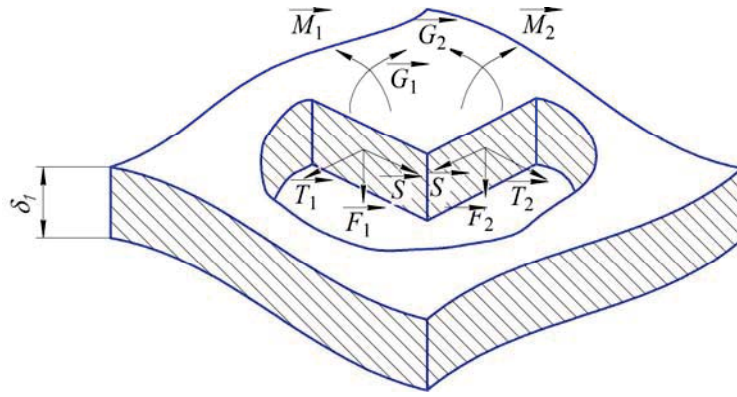


Рисунок 2 – Позитивні напрямки зусиль $\vec{T}_1, \vec{T}_2, \vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{S}, \vec{G}_1, \vec{G}_2$ і моментів \vec{M}_1, \vec{M}_2 , що діють на зсувний поверхневий шар сформований під час реалізації ТТП і ТТВ

Джерело: розроблено авторами на основі [21]

Незалежно від структури поверхні сформованого шару, діючі сили й моменти сил задовольняють звичайним рівнянням рівноваги, які використовуються в теорії тонких однорідних оболонок:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\lambda_2, T_1)}{\partial \alpha} + \frac{\partial(\lambda_1, S)}{\partial \alpha_2} - T_2 \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_2} + S \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_2} - \lambda_1 \lambda_2 \frac{F_1}{R_1} + \lambda_1 \lambda_2 N_x = 0; \\ \frac{\partial(\lambda_1, T_2)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(\lambda_2, S)}{\partial \alpha_2} - T_1 \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_2} + S \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_1} - \lambda_1 \lambda_2 \frac{F_2}{R_2} + \lambda_1 \lambda_2 N_y = 0; \\ \frac{\partial(\lambda_2, F_1)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(\lambda_1, F_2)}{\partial \alpha_2} + \lambda_1 \lambda_2 \left(\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} \right) - \lambda_1 \lambda_2 N_z = 0; \\ \frac{\partial(\lambda_2, G_1)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(\lambda_1, M_2)}{\partial \alpha_2} - G_2 \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_1} + M_1 \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_2} - \lambda_1 \lambda_2 F_1 = 0; \\ \frac{\partial(\lambda_1, G_2)}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial(\lambda_2, M_1)}{\partial \alpha_1} - G_1 \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_1} + M_2 \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_1} - \lambda_1 \lambda_2 F_2 = 0. \end{cases} \quad (8)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, R_1, R_2$ – параметри Ляме – показники анізотропії та найменші радіуси кривизни у взаємоперпендикулярних площинках; N_x, N_y, N_z – компоненти навантаження на поверхню; $S_1 = S_2 = S$.

Систему рівняння (8) розв'яжемо для граничних умов, коли граничним контуром є лінія $\alpha_1 = \text{const}$:

– якщо край поверхневого шару вільний:

$$T_1 = S = F_1 + \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial M_1}{\partial \alpha_2} = G_1 = 0;$$

– якщо край поверхневого шару жорстко закріплений:

$$S_1 = S_2 = S_3 = \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial S_3}{\partial \alpha_1} - \frac{U}{R_1} = 0;$$

– якщо край поверхневого шару нерухомо обпертий:

$$S_1 = S_2 = S_3 = 0; G_1 = 0 \text{ і т.д.}$$

Визначивши, таким чином, компоненти переміщення S_1, S_2, S_3 , знаходимо пружні сил й моменти сил, що діють на поверхневий шар при реалізації ТТП або ТТВ:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= E_{1e} \delta_1 (\varepsilon_1 + \mu \varepsilon_2); & T_2 &= E_{1e} \delta_1 (\varepsilon_2 + \mu \varepsilon_1); \\
 G_1 &= -\frac{E_{1e} \delta_1^3}{12} (\xi_1 + \mu \xi_2); & G_2 &= -\frac{E_{1e} \delta_1^3}{12} (\xi_2 + \mu \xi_1); \\
 S &= E_{1e} \delta_1 (1 - \mu) \varepsilon_3; & M &= \frac{E_{1e} \delta_1^3}{12} (1 - \mu) \xi_3,
 \end{aligned}$$

де $E_e = E_1 / (1 - \mu_1^2)$ – ефективний модуль пружності покриття. Компоненти деформацій, враховуючи попереднє, дорівнює:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \frac{1}{H_{3e}^{pc} (1 - \mu_{3e}^2)} (T_1 - \mu_{3e} T_2); \\
 \varepsilon_2 &= \frac{1}{H_{3e}^{pc} (1 - \mu_{3e}^2)} (T_2 - \mu_{3e} T_1); \\
 \varepsilon_3 &= \frac{1}{H_{3e}^{pc} (1 - \mu_{3e}^2)} S; \\
 \xi_1 &= -\frac{1}{H_{3e}^e (1 - \mu_{3e}^2)} (G_1 - \mu_{3e} G_2); \\
 \xi_2 &= -\frac{1}{H_{3e}^e (1 - \mu_{3e}^2)} (G_2 - \mu_{3e} G_1); \\
 \xi_3 &= -\frac{1}{H_{3e}^e (1 - \mu_{3e}^2)} M_{1(2)},
 \end{aligned} \right.$$

де $\mu_{3e} = (\mu_1 E_1 \delta_1 + \mu_2 E_2 \delta_2) / (E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)$; H_{3e}^{pc} – зведена твердість двошарової системи при деформаціях розтягу-стиску $H_{3e}^{pc} = (E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2) / (1 - \mu_{3e}^2)$; H_{3e}^e – зведена твердість двошарової системи при деформації вигині,

$$H_{3e}^e = \frac{E_1^2 \delta_1^4 + 4E_1 E_2 \delta_1^3 \delta_2 + 6E_1 E_2 \delta_1^2 \delta_2^2 + 4E_1 E_2 \delta_1 \delta_2^3 + E_2^2 \delta_2^4}{12(E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)}.$$

Визначити компоненти деформації поверхневого шару деталі можна також через компоненти переміщень S_1 , S_2 , S_3 :

$$\left\{ \begin{aligned}
 \varepsilon_1 &= \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial S_1}{\partial \alpha_1} + \frac{S_2}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_2} + \frac{S_3}{R_1}; \\
 \varepsilon_2 &= \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial S_2}{\partial \alpha_2} + \frac{S_1}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_1} + \frac{S_3}{R_2}; \\
 2\varepsilon_3 &= \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left(\frac{S_2}{\lambda_2} \right) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{S_1}{\lambda_1} \right); \\
 \xi_1 &= \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left(\frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial S_3}{\partial \alpha_1} \frac{S_1}{R_1} \right) - \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_2} \left(\frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial S_3}{\partial \alpha_2} \frac{S_1}{R_2} \right); \\
 \xi_2 &= \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left(\frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial S_3}{\partial \alpha_2} \frac{S_2}{R_2} \right) - \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_1} \left(\frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial S_3}{\partial \alpha_1} \frac{S_1}{R_1} \right); \\
 \xi_3 &= \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2} \left(\frac{\partial^2 S_3}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} - \frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_2} \frac{\partial S_3}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_1} \frac{\partial S_3}{\partial \alpha_2} \right) + \\
 &+ \frac{1}{R_1} \left(\frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial S_1}{\partial \alpha_2} - \frac{S_1}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{\partial \lambda_1}{\partial \alpha_2} \right) + \frac{1}{R_2} \left(\frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial S_2}{\partial \alpha_1} - \frac{S_2}{\lambda_1 \lambda_2} \frac{\partial \lambda_2}{\partial \alpha_1} \right).
 \end{aligned} \right.$$

Після визначення компонентів деформації зведеного поверхневого шару переходимо до визначення напружень у нормальних перерізах двошарової системи відповідно до узагальненого закону Гука, з урахуванням гіпотез Кірхгофа-Ляве у верхньому його підшарі покриття:

$$\begin{cases} \sigma_1^{(1)} = E_1[\varepsilon_1 + \mu_1\varepsilon_2 + z(\xi_1 + \mu_1\xi_2)]; \\ \sigma_2^{(1)} = E_1[\varepsilon_2 + \mu_1\varepsilon_1 + z(\xi_2 + \mu_1\xi_1)]; \\ \tau^{(1)} = E_1(1-\mu_1)(\varepsilon_3 + z\xi_3); \end{cases}$$

у нижньому підшарі системи:

$$\begin{cases} \sigma_1^{(2)} = E_2[\varepsilon_1 + \mu_2\varepsilon_2 + z(\xi_1 + \mu_2\xi_2)]; \\ \sigma_2^{(2)} = E_2[\varepsilon_2 + \mu_2\varepsilon_1 + z(\xi_2 + \mu_2\xi_1)]; \\ \tau^{(2)} = E_2(1-\mu_2)(\varepsilon_3 + z\xi_3). \end{cases}$$

Таким чином, теоретично визначено вирази, за якими можливе проведення оцінки напружено-деформованого стану поверхневого шару або покриттів при реалізації триботехнологій припрацювання та відновлення.

Висновки:

1. Розроблено загальний теоретичний підхід до моделювання напружено-деформованого стану поверхневого шару матеріалу і оцінки його характеристик при реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення. Проведено попередню оцінку напружено-деформованого стану поверхневого шару як двопідшарової структури.

2. Запропоновано концептуальну модель напружено-деформованого шару, сформованого під дією триботехнологій припрацювання і відновлення, як системи, що дозволяє визначити компоненти деформацій і напружень у зовнішній та у внутрішній його частинах.

3. Проведені попередні оцінки за допомогою цієї моделі показали, що міцність основи деталей трибоспрязень та їх довговічність не погіршуються, а навіть збільшуються на 3...5%. Це свідчить про те, що застосування геомодифікаторів в оливному середовищі під час реалізації триботехнологій припрацювання і відновлення приводить не тільки до поліпшення триботехнічних характеристик робочих поверхонь деталей спряжень, але й не погіршують механічних критеріїв їх працездатності. Аналітичне обґрунтування може стати основою для створення повноцінної математичної моделі при прогнозуванні поведінки деталей спряжень.

Список літератури

1. Замота Т.Н., Аулін В.В. Управление процессами приработки основных сопряжений деталей машин при изготовлении и ремонте: Монография. Кировоград: изд. Лысенко В.Ф. 2015. 303 с.
2. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія / Аулін В.В. та ін.; за ред. В.В. Ауліна. Кропивницький: Лисенко В. Ф. 2016. 303 с.
3. Аулін В.В., Кузик О.В. Зміна стану зон тертя деталей машин та динамічне трибоматеріалознавство їх поверхневих шарів. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація.* 2013. Вип. 26. С.32-40.
4. Аулін В.В., Лисенко С.В., Замота Т.М. Зменшення механічних втрат в основних спряженнях деталей дизелів МСГТ і АТТ триботехнологіями відновлення. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Сер.: Техніка та енергетика АПК.* 2017. Вип.262. С.211-227.
5. Трибологические переходы при приработке поверхностей трения сопряжений деталей / Аулін В.В. и др. *Проблеми трибології.* 2017. № 4. С. 87-96.
6. Фізико-мезомеханічний підхід до виявлення характеру зношування спряжень деталей

- сільськогосподарської і автотранспортної техніки / Аулін В.В., Лисенко С.В., Кузык О.В., Жилова І.В. *Проблеми трибології*. 2017. № 4. С. 82-86.
7. Можливості технологій триботехнічного відновлення для підвищення зносостійкості і довговічності спряжень деталей транспортних засобів / Аулін В.В. та ін. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті: науковий журнал*. 2018. №1(10). С. 5-11.
 8. Перспективи розвитку триботехнологій підвищення довговічності деталей дизелів мобільної техніки / Аулін В.В., Соловух Е.К., Лисенко С.В., Кузык А.В. *Матеріали Міжнарод. науч.-практ. конф., посвященої 100-летию со дня народження професора Вадивасова Д.Г.* Саратов: СГАУ. 2009. С.10-16.
 9. Аулін В.В., Лисенко С.В. Фізико-технологічні засади підвищення надійності трибосистем дизелів мобільної сільськогосподарської техніки. *Вісник ЖНАЕУ: науково-теоретичний збірник*. 2014. вип. № 2 (45), т.4, ч.ІІ. С. 56-68.
 10. Аулін В.В., Замота Т.Н., Лисенко С.В. Повышение эксплуатационной износостойкости деталей машин их триботехническим восстановлением и управлением процессами приработки. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol.18. No.2. P. 89-96.
 11. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия / отв. ред. А.Ю. Ишлинский. Москва: Наука. 2001. 478 с.
 12. Аулін В.В., Замота Т.Н. Развитие площади пятна контакта при макроприработке поверхностей трения. *Проблеми трибології*. 2012. №1. С.9-13.
 13. Воронин Н.А. Инженерный метод решения контактной задачи о взаимодействии цилиндрического штампа с упругим двухслойным полупространством. *Трение и износ*. 1994. Т.14, № 5. С. 754-763.
 14. Аулін В.В. Замота Т.Н., Лисенко С.В. Повышение долговечности мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки триботехнологіями приработки основных сопряжений деталей двигателей. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. №8. С. 55-68.
 15. Аулін, В.В., Лисенко С.В., Білик А.П. Трибофізичне та фізико-технологічне обґрунтування комбінованого функціонально-спрямованого зміцнення та модифікування деталей і робочих органів СГТ. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. 2014. Вип. 44. С. 92-103.
 16. Аулін В.В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах: монографія. Кіровоград: Вид. Лисенко В.Ф. 2014. 370 с.
 17. Масштабно-рівневий підхід до аналізу процесів в матеріалах трибоспрязень деталей мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки / Аулін В.В., Лисенко С.В., Великодний Д.О., Гупка А.Б. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип.47, ч.І. С.52-59.
 18. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: пер. с англ. / под ред. Г.С. Шапиро 2-е изд., Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. 560 с.
 19. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / Биргер И.А. и др. – 4-е изд., перераб. и доп., Москва: Машиностроение. 1993. 640 с.
 20. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки: дис. д-ра. техн. наук : 05.02.04 / КНТУ. Кіровоград, 2014. 447 с.
 21. Джус Р.М., Приймаков О.Г., Приймаков Г.О. Моделювання процесів відновлення трибосполучень військової техніки застосуванням ревіталізаторів. *Системи обробки інформації*. 2007. Вип.2. С. 16-19.

References

1. Zamota, T.N., Aulin, V.V. (2015). *Upravlenie protsessami prirabotki osnovnykh sopryazheniy detaley mashin pri izgotovlenii i remonte: Monografiya [Management of the running-in processes of the main interfaces of machine parts in the manufacture and repair: Monograph]*. Kirovograd: izd. Lyisenko V.F. [in Russian].
2. Aulin, V.V. at all. (2016). *Trybofizychni osnovy pidvyshchennia nadiinosti mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki tekhnolohiiamy trybotekhnichnoho vidnovlennia: monohrafiia [Tribophysical fundamentals of increasing the reliability of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnical recovery technologies: monograph]*. Kropyvnytskyi: Lysenko V.F. [in Ukrainian].
3. Aulin, V.V., Kuzyk, O.V. (2013). *Zmina stanu zon tertia detalei mashyn ta dynamichne trybomaterialoznavstvo yikh poverkhnevyykh shariv [Changing the state of friction zones of machine parts and the dynamic tribomateriality of their surface layers]*. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannia, avtomatyzatsiia – Collection of scientific works of Kirovohrad National Technical*

- University. *Engineering in agricultural production, industry engineering, automation. Issue 26*, 32-40 [in Ukrainian].
4. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Zamota, T.M. (2017) Zmenschennia mekhanichnykh vtrat v osnovnykh spriazhenniakh detalei dyzeliv MSHT i ATT trybotekhnolohiiamy vidnovlennia [Reduction of mechanical losses in the main conjugations of the details of the MSCM and MV diesels with tribotechnology of restoration]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Ser.: Tekhnika ta enerhetyka APK – Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Ser.: APC Engineering and Energy, Issue 262*, 211-227 [in Ukrainian].
 5. Aulin, V.V. et al. (2017). Tribologicheskie perehody pri prirabotke poverhnostey treniya sopryazheniy detalej [Tribological transitions in the fitting of friction surfaces of joints of parts]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, № 4*, 87-96 [in Russian].
 6. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Kuzyk, O.V., Zhylova, I.V. (2017). Fyzyko-mezomekhanichni pidkhyd do vyavleniia kharakteru znoshuvannia spriazhen detalei silskohospodarskoi i avtotransportnoi tekhniki [Physico-mesomechanical approach to detecting the nature of the wear of the coupling of agricultural and motor vehicle parts]. *Problemy trybolohii - Problems of tribology, № 4*, 82-86 [in Ukrainian].
 7. Aulin, V.V. et al. Mozhlyvosti tekhnolohii trybotekhnichnoho vidnovlennia dlia pidvyshchennia znosostiikosti i dovhovichnosti spriazhen detalei transportnykh zasobiv [Possibilities of tribotechnical restoration technologies to improve the durability and durability of the conjugations of vehicle parts]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti: naukovyi zhurnal – Modern technologies in mechanical engineering and transport: scientific journal, №1(10)*, 5-11 [in Ukrainian].
 8. Aulin, V.V., Solovyh, E.K., Lysenko, S.V., Kuzyk, A.V. (2009). Perspektivy razvitiya tribotehnologij povysheniya dolgovechnosti detalej dizelej mobilnoj tehniki [Prospects for the development of tribotechnologies for increasing the durability of diesel engine parts of mobile equipment]. *Materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya professora Vadivasova D.G. – Materials Intern. scientific-practical Conf., dedicated to the 100th anniversary of Professor Vadivasov D.G., (pp.10-16) Saratov: SGAU* [in Russian].
 9. Aulin, V.V., Lysenko, S.V. (2014). Fyzyko-tekhnolohichni zasady pidvyshchennia nadiinosti trybosystem dyzeliv mobilnoi silskohospodarskoi tekhniki [Physico-technological principles of increasing the reliability of tribosystems of diesels of mobile agricultural machinery]. *Visnyk ZhNAEU: naukovoteoretychnyi zbirnyk - ZhNAEU Bulletin: scientific and theoretical collection, issue. № 2(45), T. 4, part II*. 56-68 [in Ukrainian].
 10. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2016). Povyszenie ekspluatacionnoy iznosostoykosti detaley mashin ih tribotehnicheskim vosstanovleniem i upravleniem processami prirabotki [Improving the operational wear resistance of machine parts by their tribotechnical restoration and management of running-in processes]. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture, Vol.18, No.2*, 89-96 [in Russian].
 11. Goryacheva, I.G. (2001). *Mehanika frikcionnogo vzaimodeystviya [Friction Mechanics]*. Moskow: Nauka [in Russian].
 12. Aulin, V.V., Zamota, T.N. (2012). Razvitie ploschadi pyatna kontakta pri makroprirobotke poverhnostey treniya [The development of the area of the contact spot during macroprocessing of friction surfaces]. *Problemi tribologii – Problems of tribology, №1*, 9-13 [in Russian].
 13. Voronin, N.A. (1994). Inzhenernyy metod resheniya kontaktnoy zadachi o vzaimodeystvii cilindricheskogo shtampa s uprugim dvuhslonynym poluprostranstvom [An engineering method for solving the contact problem of the interaction of a cylindrical stamp with an elastic two-layer half-space]. *Trenie i iznos – Friction and wear, V.14, No.5*, 754-763 [in Russian].
 14. Aulin, V.V., Zamota, T.N., Lysenko, S.V. (2017). Povyszenie dolgovechnosti mobil'noy sel'skohozyaystvennoy i avtotransportnoy tehniki tribotehnologiyami prirabotki osnovnykh sopryazheniy detaley dvigateley [Improving the longevity of mobile agricultural and motor vehicles with tribotechnologies of running-in of the main interfaces of engine parts]. *Tekhnichniy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv – Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes, №8*, 55-68 [in Russian].
 15. Aulin, V.V., Lysenko S.V., Bilyk A.P. (2014). Trybofizychni ta fyzyko-tekhnolohichni obruntuvannia kombinovanoho funktsionalno-spriamovanoho zmitsnennia ta modyfikuvannia detalei i robochykh orhaniv SHT [Tribophysical and physico-technological substantiation of combined functionally directed strengthening and modification of parts and working bodies of the SGT]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn: Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk – Design, production and operation of agricultural machines: National interagency scientific and technical collection, Vol. 44*, 92-103 [in Ukrainian].

16. Aulin, V.V. (2014). *Fizychni osnovy protsesiv i staniv samoorganizatsii v trybotekhnichnykh systemakh: monohrafiia* [Physical bases of processes and states of self-organization in tribotechnical systems: monograph]. Kirovohrad: Vyd. Lysenko V.F. [in Ukrainian].
17. Aulin, V.V., Lysenko, S.V., Velykodnyi, D.O., Hupka, A.B. (2017). Masshtabno-rivnevyyi pidkhid do analizu protsesiv v materialakh trybospriazhen detalei mobilnoi silskohospodarskoi ta avtotransportnoi tekhniki [A scale-level approach to the analysis of processes in tribal materials of details of mobile agricultural and motor vehicles] *Zahalnoderzhavnyi mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn – National interagency scientific and technical collection. Design, production and operation of agricultural machines, Issue 47, Part II*, 52-59 [in Ukrainian].
18. Timoshenko, S.P., Gud'er Dzh. (1979). *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Science. The main edition of the physical and mathematical literature [in Russian].
19. Birger, I.A. et al. (1993). *Raschet na prochnost' detaley mashin: Spravochnik* [The calculation of the strength of machine parts: Reference]. M.: Mashinostroenie [in Russian].
20. Aulin, V.V. (2014). 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. Kirovohrad [in Ukrainian].
21. Dzhus, R.M., Pryimakov, O.H., Pryimakov, H.O. (2007). Modeliuvannia protsesiv vidnovlennia tribopoluchen viiskovoi tekhniki zastosuvanniam revitalizantiv [Modeling of the process of restoration of military equipment tribulations by the use of revitalizers]. *Systemy obrobky informatsii – Information processing systems, Issue 2*, 16-19 [in Ukrainian].

Viktor Aulin, Prof., DSc., **Serhiy Lysenko**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andriy Grinkiv**, PhD tech. sci., Senior Researcher, **Volodymyr Yatsun**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Skrynnik**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Andriy Gupka, PhD tech. sci.

Ternopol National Technical University named after Ivan Puluy, Ternopol, Ukraine

Stress-strain State of the Surface Layer of Parts During the Implementation of Tribotechnical Running-in and Recovery Technologies

When solving the problem of increasing the wear resistance and reliability of machine systems and assemblies, an important factor is to take into account the stress-strain state of the working surface layer of parts. This state changes if the part is purposefully strengthened during coating or when the operating modes of the tribological conjugations of the parts are changed. In this work, the tribotechnologies of running-in and recovery are taken as modifying actions and the concept of a dynamic approach to changing stress and strain fields is developed. An attempt is made to simulate a stress-strain layer of a part during operation.

From a theoretical point of view, the influence of tribological technologies of running-in and recovery on the formation of the stress-strain state of the surface layers of the conjugate parts of systems and assemblies of vehicles is considered. It was determined that the vast majority of their tribological conjugations work under conditions of plastic saturated or unsaturated contacts. The modified surface layer formed by the implementation of tribological technologies of running-in and recovery of mating parts was considered as structural-orthotropic shells.

Given the system of acting forces and moments of forces, it is shown that they satisfy the equilibrium equations characteristic of thin homogeneous shells. The stress and strain components of the surface layer obtained in accordance with the generalized Hooke law, taking into account the Kirchhoff-Lave hypothesis. These expressions can be used to assess the stress-strain state of the mating surfaces of parts when they are modified or exposed during the implementation of tribological technologies of running-in and recovery to increase their resource. It should be noted that in the formulas the average values of the value characterizing the stress-strain state of the material of the part are used.

stress-strain state, tribotechnical running-in, tribotechnical recovery, modeling, surface layer, stress

Одержано (Received) 27.02.2019

Прорецензовано (Reviewed) 14.03.2019

Прийнято до друку (Approved) 04.06.2019