

УДК 621.891 : 621.316

Р.М. Джус<sup>1</sup>, О.Г. Приймаков<sup>2</sup>, Г.О. Приймаков<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТРІБОСПОЛУЧЕНЬ ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ ЗАСТОСУВАННЯМ РЕВІТАЛІЗАНТІВ

*Для застосування технологій тріботехнічного відновлення у агрегатах озброєння та військової техніки запропоновано загальний підхід до моделювання напружено-деформованого стану поверхонь тертя з металокерамічними покриттями, що утворилося під впливом ревіталізантів. Проведено попередню оцінку напружено-деформованого стану цієї двошарової структури.*

*моделювання напружено-деформованого стану, технології тріботехнічного відновлення, ревіталізанти, двошарова система з металокерамічним покриттям.*

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури.

Актуальність подовження ресурсу та підвищення ефективності ремонту агрегатів сучасного озброєння та військової техніки (ОВТ) не викликає сумнівів. В останній час широке розповсюдження отримали методи ремонту та подовження ресурсу пар тертя за допомогою ревіталізантів (технології тріботехнічного відновлення (ТТВ)) [1, 2]. Однак брак інформації про ТТВ, частково внаслідок її комерційної закритості, а частково й із-за її відсутності, заважає широкому застосуванню цих перспективних технологій у авіації та інших та інших відповідальних та високотехнологічних видах ЗС України. Тому розкриття фізичної сутності процесів, що відбуваються на поверхнях тертя при застосуванні ревіталізантів, є актуальною науковою задачею. Внаслідок важкості експериментальних досліджень таких процесів [3] та неоднозначності їх результатів [4] перспективними стають методи математичного моделювання.

**Метою статті** є розробка підходу до моделювання та концептуальної моделі аналізу поверхневих шарів деталей ОВТ, що піддаються модифікації ревіталізантами з перспективою подальшого створення повноцінної математичної моделі для прогнозування ресурсу та розмірів таких деталей.

Відомо, що на поверхнях тертя, модифікованих за ТТВ, утворюється новий «ремонтно-відновлювальний» шар специфічної структури, складу та властивостей [3 – 5]. Його склад залежить від застосованого ревіталізанта, але завжди це металокерамічна композиція (МК-шар). Розглянемо передумови створення **концептуальної моделі аналізу напружено-деформованого стану** (НДС) такого МК-шару.

Математичній постановці завдань визначення характеристик контакту при силовій взаємодії двох твердих пружних тіл присвячені роботи [6 – 8]. У роботі [6] розвинений інженерний метод рішення контактних завдань, що приводять до одержання наближених аналі-

тичних виразів для визначення параметрів контакту. Пізніше [7], на основі цього методу були отримані вирази для визначення ширини й осідання в завданні про взаємодію циліндричного штампку із пружним двошаровим півпростором. Моделюванню контакту сферичних поверхонь із урахуванням шорсткості, хвилястості, макровідхилень і фізико-механічних властивостей поверхневого шару присвячена робота [8].

У цей час відома досить велика кількість моделей і зроблені обчислення характеристик контакту для поверхонь різних конфігурацій. Недоліком запропонованих методик розрахунку є те, що параметри стану поверхневого шару враховуються не повною мірою. Відомо, що матеріали, що працюють в умовах контактної взаємодії й тертя ковзання, мають здатність трансформації вихідної структури. Установлено, що при роботі важко навантажених пар при контактних навантаженнях  $\sigma = 700 \dots 1800$  МПа в процесі прироблення має місце збільшення перекручувань кристалічної структури, щільності дислокацій, викликані великим ступенем деформації мікропрофілю [9]. Перехід від вихідного стану поверхні до експлуатаційного й наступного руйнування супроводжується складними фізико-механічними й структурними перетвореннями в поверхневих шарах, які доцільно враховувати при розрахунку параметрів контакту. Тому розгляд НДС для матеріалу із МК-шаром може базуватися на даному підході, що враховує, однак, основну реологічну відмінність у порівнянні із класичним тертям. Найбільш застосовним підходом при аналізі самоорганізуемих процесів у трібосистемі (ТС) є інформаційно-статистичний підхід, який, у свою чергу, не може бути проведений без аналізу діючих сил і моментів.

### Результати досліджень

**Аналіз складного напруженого стану, у якому перебуває система «основний матеріал-покриття з ревіталізанта».** Металокерамічний шар перебуває в умовах складного напруженого стану, тому що на нього одночасно діють дотичні напру-

ження зсуву й крутіння, а також нормальні напруження розтягання-стиску й поздовжнього вигину. Реальну картину НДС стану МК-шару можна оцінити по величині еквівалентних напруг, відомих по IV енергетичній гіпотезі міцності С.П. Тимошенко:

$\sigma_{\text{екв.IV}} = \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2 + 3\tau_{\Sigma}^2}$ , де  $\sigma_{\Sigma}$  – нормальні сумарні напруження в небезпечному перерізі;  $\tau_{\Sigma}$  – сумарні дотичні напруження в небезпечному перерізі. Небезпечним перерізом буде перетин, де діє максимальну контактну напругу  $q_{\text{max}}$ .

Для перевірки правильності визначення величини  $\sigma_{\Sigma}$  можна скористатися залежністю по визначенню нормальних середніх напруг у зонах контакту абсолютно твердої кулі із плоскою поверхнею пружно деформованого матеріалу (об'ємна модель

Винклера) [10]:  $\sigma_n = \frac{0,42E_{\text{пр}}}{(1-\nu_{\text{пр}}^2)} \sqrt{\frac{h}{R}}$ , де  $R$  – радіус

кулі-індентора;  $\nu_{\text{пр}}$  – приведений коефіцієнт Пуассона матеріалу із МК-шаром;  $E_{\text{пр}}$  – приведений модуль пружності матеріалу із МК-шаром [11];  $h$  – товщина зони деформованого МК-шару.

МК-шар також перебуває в умовах пластичності й повзучості, і оскільки він виникає при нестационарному зовнішньому навантаженні, має сенс назвати їх динамічною повзучістю.

Розрахунок на динамічну повзучість зводиться до визначення довговічності деталі із МК покриттям при відомих або заданих температурі, еквівалентному напруженні й граничній деформації.

Задаючись граничною відносною деформацією  $\varepsilon$ , і використовуючи криву Велера для даної температури, можна встановити довговічність  $N$ , що відповідає характерному значенню  $\sigma_{\text{екв}}$  або  $\sigma_{-1}$ . Аналогічно вирішується й зворотнє завдання – визначення граничних напруг по заданій довговічності  $N$  і граничній відноській деформації  $\varepsilon$ .

При пружних деформаціях у зонах контакту із МК-шаром число циклів до руйнування (циклічна довговічність) визначається відповідно до моделі Винклера:  $n = (\sigma_b / \sigma_p)^m$ , де  $\sigma_b$  – межа міцності;  $\sigma_p$  – напруження розтягання-стиску, викликані силами тертя;  $m$  – показник ступеня в класичному рівнянні Велера, залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, для високолегованих жаростійких конструкційних сталей  $m = 4$  [12, 13].

У випадку пластичного ненасиченого контакту багаторазове пластичне деформування викликає зношування від малоциклової втоми. У цьому випадку число циклів до руйнування дорівнює:  $n = (2\varepsilon_b / \varepsilon_t)^m$  де  $\varepsilon_b$  – деформація, що відповідає межі міцності  $\sigma_b$ ;  $\varepsilon_t$  – деформація, що виникає під дією сил тертя.

Установлено, що  $\varepsilon_t = 0,025\mu\text{tg}\theta$ , де  $\mu$  – коефіцієнт тертя;  $\theta$  – кут нахилу мікронерівності до площини її основи. При пружному ненасиченому контакті

$\tau_n = \tau_0 + \beta q_{\text{max}}$ , де  $\tau_0$  й  $\beta$  – фрикційні характеристики, що залежать від умов роботи пари тертя [14]. Одержимо основні показники зношування, а саме коефіцієнт тертя  $\mu$ , інтенсивність зношування  $I_h$ , питомий тиск у зоні контакту  $q_{\text{max}}$  залежно від параметрів НДС і фізико-механічних характеристик:

$$\mu = 1,4 \left[ \frac{\tau_0(1-\nu_{\text{пр}}^2)}{E_{\text{пр}}} \right] + \beta; I_h = \frac{1,5}{\pi\alpha} \left( \frac{h}{R} \right)^{1/2};$$

$$q_{\text{max}} = 1,66 \left[ \frac{\tau_0 E_{\text{пр}}}{(1-\nu_{\text{пр}}^2)\alpha} \right]^{1/2},$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт, що характеризує напружений і кінематичний стан у зоні контакту  $f(\nu, \sigma_{\text{екв}})$ ;  $\nu$  – швидкість ковзання в зоні контакту. Для пружного ненасиченого контакту рекомендується  $\alpha \approx 0,75$ , для насиченого –  $\alpha \approx 0,88$  [13];  $E_{\text{пр}}$  і  $\nu_{\text{пр}}$  – приведені значення модулів пружності й коефіцієнту Пуассона матеріалу із МК-шаром [14]

Якщо  $n \rightarrow +\infty$ , що має місце при поводженні МК-шару як квазів'язкого тіла, то  $\sigma_b \rightarrow 0$  (можливо також одночасне прагнення  $m \rightarrow +\infty$ ), тобто МК-шар переходить із пружної області в динамічну повзучість.

Аналіз такого роду змін у ТС із МК-шаром вимагає більш детального розгляду НДС.

**Аналіз НДС двошарової системи «основний матеріал-покриття з ревіталізанта».** Виходячи з гіпотез Кірхгофа-Лява, можна складні просторові завдання аналізу НДС конструктивно-ортотропних систем звести до двовимірних, тобто розглянути процес деформування поверхні приведення.

МК-шар, нанесений на базову поверхню, являє собою конструктивно-ортотропну оболонку, поверхню приведення якої визначається параметром  $z_0$  (рис. 1).

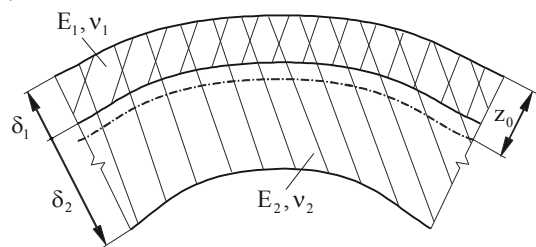


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення параметру  $z_0$

Виходячи з [15], параметр  $z_0$  визначається так:

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

Поверхня приведення перебуває у верхньому шарі, якщо  $E_1\delta_1^2 > E_2\delta_2^2$ , у нижньому шарі, якщо  $E_1\delta_1^2 < E_2\delta_2^2$ , і збігається з поверхнею розділу фаз, якщо  $E_1\delta_1^2 = E_2\delta_2^2$ . Ця обставина й визначає фізичний зміст умови приведення Вілларсо. У якості системи координат, що визначає положення крапки на поверхні приведення, оберемо ортогональну систему криволінійних координат  $\alpha_1$ ,

$\alpha_2$ , координатні лінії якої збігаються з лініями кривизни поверхні приведення. Розташування волокон по товщині будемо визначати відстанню  $z$  від поверхні приведення, причому вона буде позитивною, якщо волокно розташоване з боку зовнішньої нормалі.

Відносні подовження й зрушення поверхні приведення позначимо через  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \omega = 2\varepsilon_3$ , зміни кривизни й крутіння поверхні приведення – через  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$ . Ці параметри повністю визначають деформований стан двошарової оболонки й виражаються через компоненти переміщення уздовж координатних ліній  $U, V$  і по зовнішній нормалі  $W$  відомими формулами [16].

Напружений стан оболонки, що виникає в нормальних перетинах, описується цілком певними функціями координати  $z$  незалежно від структури оболонки МК-шару по товщині. Підсумовуючи напруги по товщині оболонки, систему напруг можна замінити статично еквівалентною системою сил і моментів  $T_1, T_2, S, G_1, G_2, H_1, H_2$  і, таким чином, розрахунок оболонки зводиться до задачі вивчення рівноваги й деформування поверхні приведення (рис. 2).

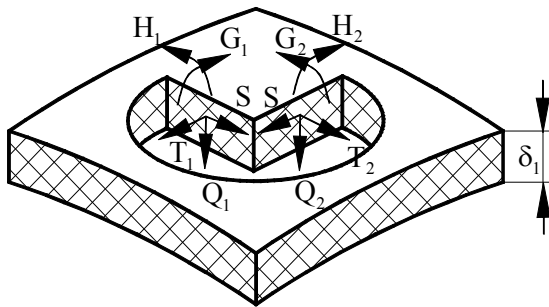


Рис. 2. Позитивні напрямки зусиль і моментів

Незалежно від структури оболонки МК-шару, зусилля й моменти задовольняють звичайним рівнянням рівноваги, які використовуються в теорії тонких однорідних оболонок. Рівняння рівноваги двошарової системи, що містить зовнішній МК-шар і внутрішню базову поверхню, запишемо так:

$$\left\{ \begin{aligned} & \frac{\partial(A_2 T_1)}{\partial \alpha} + \frac{\partial(A_1 S)}{\partial \alpha_2} - T_2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_2} + S \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} - \\ & \quad - A_1 A_2 \frac{Q_1}{R_1} + A_1 A_2 X = 0; \\ & \frac{\partial(A_1 T_2)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(A_2 S)}{\partial \alpha_2} - T_1 \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} + S \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} - \\ & \quad - A_1 A_2 \frac{Q_2}{R_2} + A_1 A_2 Y = 0; \\ & \frac{\partial(A_2 Q_1)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(A_1 Q_2)}{\partial \alpha_2} + A_1 A_2 \left( \frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} \right) - A_1 A_2 Z = 0; \\ & \frac{\partial(A_2 G_1)}{\partial \alpha_1} + \frac{\partial(A_1 H_2)}{\partial \alpha_2} - G_2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} + H_1 \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} - A_1 A_2 Q_1 = 0; \\ & \frac{\partial(A_1 G_2)}{\partial \alpha_2} + \frac{\partial(A_2 H_1)}{\partial \alpha_1} - G_1 \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} + H_2 \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} - A_1 A_2 Q_2 = 0, \end{aligned} \right.$$

де  $A_1, A_2$ , – параметри Ляме (показники анізотропії у взаємоперпендикулярних площадках);  $R_1, R_2$  – найменші радіуси кривизни у взаємоперпендикулярних площинах;  $X, Y, Z$  – компоненти поверхневого навантаження.

Для визначення постійних інтегрування використовуємо граничні умови, виходячи зі збігу граничного контуру з координатними лініями.

Наприклад, якщо граничним контуром є лінія  $\alpha_1 = \text{const}$ , то мають місце наступні граничні умови:

а) коли край вільний:

$$T_1 = S = Q_1 + \frac{1}{A_2} \frac{\partial H_1}{\partial \alpha_2} = G_1 = 0;$$

б) коли край жорстко закріплений:

$$U = V = W = \frac{1}{A_1} \frac{\partial W}{\partial \alpha_1} - \frac{U}{R_1} = 0;$$

в) коли край нерухомо опертий:

$$U = V = W = G_1 = 0 \text{ і так далі.}$$

Визначивши, таким чином, компоненти переміщення  $U, V, W$ , знаходимо далі пружні зусилля й моменти:

$$T_1 = \bar{E}_1 \delta_1 (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2); \quad T_2 = \bar{E}_1 \delta_1 (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1);$$

$$G_1 = -\frac{\bar{E}_1 \delta_1^3}{12} (\xi_1 + \nu \xi_2); \quad G_2 = -\frac{\bar{E}_1 \delta_1^3}{12} (\xi_2 + \nu \xi_1);$$

$$S = \bar{E}_1 \delta_1 (1 - \nu) \varepsilon_3; \quad H = -\frac{\bar{E}_1 \delta_1^3}{12} (1 - \nu) \xi_3,$$

де  $\bar{E} = E_1 / (1 - \nu_1^2)$  – ефективний модуль пружності МК-шару. Далі визначимо його компоненти деформації:

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{B(1 - \nu_{\text{пр}}^2)} (T_1 - \nu_{\text{пр}} T_2); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{B(1 - \nu_{\text{пр}}^2)} (T_2 - \nu_{\text{пр}} T_1); \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{B(1 - \nu_{\text{пр}}^2)} S; \\ \xi_1 &= -\frac{1}{D(1 - \nu_{\text{пр}}^2)} (G_1 - \nu_{\text{пр}} G_2); \\ \xi_2 &= -\frac{1}{D(1 - \nu_{\text{пр}}^2)} (G_2 - \nu_{\text{пр}} G_1); \\ \xi_3 &= -\frac{1}{D(1 - \nu_{\text{пр}})} H_{1(2)}, \end{aligned} \right.$$

де  $\nu_{\text{пр}} = ({}_1 \bar{E}_1 \delta_1 + \nu_2 \bar{E}_2 \delta_2) / (\bar{E}_1 \delta_1 + \bar{E}_2 \delta_2)$ ;  $B$  – приведена твердість двошарової системи при розтяганні-стиску  $B = (E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2) / (1 + \nu_{\text{пр}}^2)$ ;  $D$  – приведена твердість двошарової системи при вигині,

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

Визначити компоненти деформації МК-шару можна також через компоненти переміщень  $U, V, W$ :

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial U}{\partial \alpha_1} + \frac{V}{A_1 A_2} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} + \frac{W}{R_1}; \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial V}{\partial \alpha_2} + \frac{U}{A_1 A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} + \frac{W}{R_2}; \\ 2\varepsilon_3 &= \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left( \frac{V}{A_2} \right) + \frac{A_1}{A_2} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left( \frac{U}{A_1} \right); \\ \xi_1 &= -\frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_1} \left( \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_1} - \frac{U}{R_1} \right) - \\ &\quad - \frac{1}{A_1 A_2} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \left( \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_2} - \frac{U}{R_2} \right); \\ \xi_2 &= -\frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha_2} \left( \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_2} - \frac{V}{R_2} \right) - \\ &\quad - \frac{1}{A_1 A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \left( \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_1} - \frac{U}{R_1} \right); \\ \xi_3 &= -\frac{1}{A_1 A_2} \cdot \left( \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha_1 \partial \alpha_2} - \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_1} - \frac{1}{A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \cdot \frac{\partial W}{\partial \alpha_2} \right) + \\ &\quad + \frac{1}{R_1} \left( \frac{1}{A_2} \cdot \frac{\partial U}{\partial \alpha_2} - \frac{U}{A_1 A_2} \cdot \frac{\partial A_1}{\partial \alpha_2} \right) + \frac{1}{R_2} \left( \frac{1}{A_1} \cdot \frac{\partial V}{\partial \alpha_1} - \frac{V}{A_1 A_2} \cdot \frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} \right). \end{aligned} \right.$$

Після визначення компонентів деформації поверхні приведення переходимо до визначення напруг у нормальних перерізах двошарової системи відповідно до узагальненого закону Гука з урахуванням гіпотез Кірхгофа-Лява у верхньому шарі (МК-шарі) системи:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1^{(1)} &= \bar{E}_1 [\varepsilon_1 + \nu_1 \varepsilon_2 + z(\xi_1 + \nu_1 \xi_2)]; \\ \sigma_2^{(1)} &= \bar{E}_1 [\varepsilon_2 + \nu_1 \varepsilon_1 + z(\xi_2 + \nu_1 \xi_1)]; \\ \tau^{(1)} &= \bar{E}_1 (1 - \nu_1) (\varepsilon_3 + z \xi_3), \end{aligned} \right. ;$$

у нижній підставі системи:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_1^{(2)} &= \bar{E}_2 [\varepsilon_1 + \nu_2 \varepsilon_2 + z(\xi_1 + \nu_2 \xi_2)]; \\ \sigma_2^{(2)} &= \bar{E}_2 [\varepsilon_2 + \nu_2 \varepsilon_1 + z(\xi_2 + \nu_2 \xi_1)]; \\ \tau^{(2)} &= \bar{E}_2 (1 - \nu_2) (\varepsilon_3 + z \xi_3), \end{aligned} \right. ;$$

### Висновки

Таким чином, авторам вдалося наблизити можливість застосування у агрегатах ОВТ таких перспективних технологій ремонту та подовження ресурсу, як ТТВ. Запропоновано загальний підхід до моделювання НДС такої складної системи, як поверхні тертя з МК покриттям. Проведено попередню оцінку НДС цієї двошарової структури.

Запропонована концептуальна модель НДС системи, що дозволяє визначити компоненти деформацій і напруг у зовнішньому МК-шарі й у внутрішній основі такої системи. Попередні розрахунки за допомогою цієї моделі показали, що міцність бази, її надійність і довговічність не погіршуються, а навіть збільшуються на 3 – 5%. Це доводить, що застосування ревіталізаторів приводить не тільки до поліпшення трибологічних характеристик поверхонь, але й об'єктивно не погіршують механічних критеріїв працездатності системи. Розрахунки можуть стати

основою для створення повноцінної математичної моделі для прогнозування поведінки деталей ОВТ при піддаванні їх обробці ревіталізаторами.

### Список літератури

1. Джус Р.М., Стадніченко В.М. Перспективні методи ремонту та подовження ресурсу АТ за допомогою технологій триботехнічного відновлення // НПК «Актуальні проблеми експлуатації, ремонту, розробки та модернізації АТ». – К.: ДНДІА, 2006. – С. 26.
2. Технології триботехнічного відновлення – обзор и анализ перспектив / В.А. Войтов, Р.М. Джус, Н.Г. Стадніченко та ін. // Проблеми трибології. – Хмельницький: ХМНТУ. – 2005. – № 2. – С. 71-79.
3. Стадніченко Н.Г., Джус Р.Н. Технологія применення ревіталізаторів в узлах тертя АТ з целью кардинального збільшення их ресурса // Матеріали V Міжнар. НТК “АВІА-2003”. – К.: НАУ. – 2003. – Т. 3: Виробництво та експлуатація авіаційної техніки. – С. 35.61-35.64.
4. Об образовании и функционировании металлокерамического покрытия, полученного с помощью ревитализантов / Н.Г. Стадніченко, Р.Н. Джус и др. // Вестник науки и техники. – Х.: ХДНТ, 2004. – № 1 (16). – С. 18-27.
5. Джус Р.Н. Системно-фізический подход к объяснению безыносного трения при использовании ревитализантов // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Х.: НАКУ «ХАИ», 2004. – Вып. 23. – С. 183-186.
6. Воронин Н.А. Применение теории упругого контакта Герца к расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела // Трение и износ. – 1993. – Т. 14, № 2. – С. 250-258.
7. 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.
8. Сулов А.Г., Горленко А.О. Контактное взаимодействие сферических пар трение // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 4. – С. 595-601.
9. Структурные изменения в поверхностных слоях сталей ШХ15 и 110Х15Г в условиях трения качения / В.Г. Новицкий, В.И. Тихонович, А.В. Ковальский и др. // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 1. – С. 122-125.
10. Биргер И.А., Шор Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
11. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
12. Демаков И.П., Балагезан Ю.Г. Оптимизация испытаний на надежность и обработка их результатов. – М.: Машиностроение, 1979. – 56 с.
13. Приймаков О.Г., Мясягин В.І. Втомленість авіаційних конструкцій та засоби її попередження // Інтегральні технології та енергозбереження. – 2002. – С. 32-41.
14. Приймаков О.Г., Лисяк О.О., Приймаков Г.О. Прогнозування надійності та довговічності авіаційної техніки // Вестник науки и техники. – 2003. – № 1. – С. 12-19.
15. Александров В.М., Мхитарян С.Н. Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками. – М.: Наука, 1983. – 487 с.
16. Гольденвейзер А.Л. Теория упругих тонких оболочек. – М.: Наука, 1976. – 391 с.

Надійшла до редколегії 14.02.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, професор В.А. Войтов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.