

УДК 621.923.6:621.318.4:621.002.1

© Т. А. Роїк, д.т.н., професор, П. О. Киричок, д.т.н., професор, О. С. Хлус, аспірантка, А. П. Гавриш, д.т.н., професор, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН З ВИСОКОЗНОСОСТІЙКИХ КОМПЗИТИВ НА ОСНОВІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ І НІКЕЛЮ ЗА УМОВ ТОНКОГО АБРАЗИВНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ

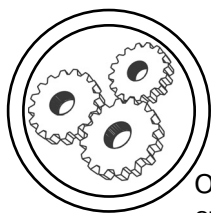
У статті наведено результати теоретико-експериментального дослідження температурного поля підшипників ковзання поліграфічних машин з нових високозносостійких композиційних матеріалів, синтезованих на основі використання утилізованих та регенованих відходів виробництва деталей з інструментальних сталей і нікелю типу 11P3AM3Ф2, 7XГ2ВМФ, 5XB3МФС, ХН55ВТКЮ, ХН50ВТФКЮ, та його впливу на формування залишкових напружень у поверхневому шарі композитної деталі для умов тонкого абразивного шліфування. Запропоновано чисельно-аналітичний метод вирішення задач термопружності і визначення температурного поля структурно-неоднорідного тіла для випадку стабільності силових параметрів різання у зоні формування напружень за умов прецизійного тонкого абразивного шліфування. Запропонований метод базується на методі кінцевих елементів вирішення задач термопружності. Отримано залежності для визначення температурного поля і наведено числові приклади їх вирішення для реальних умов виробництва. Розроблено практичні рекомендації по режимам різання при тонкому шліфуванні та призначенню параметрів абразивних інструментів для промисловості при виробництві поліграфічних машин.

Ключові слова: високозносостійкі композиційні матеріали; тонке абразивне шліфування; параметри якості поверхні; температурне поле зони різання; термопружність; структурно-неоднорідне тіло; варіаційний функціонал; зародок тріщини; промислові рекомендації.

Постановка проблеми

Однією з найважливіших проблем при створенні новітніх зразків сучасної техніки для тех-

нологічних комплексів є забезпечення високих параметрів їх надійності, довговічності, зносостійкості та ремонтоздатності.



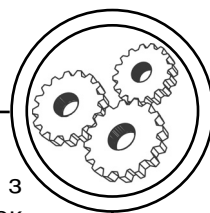
Особливо гостро це питання постає у випадках, коли деталі, вузли, механізми та у цілому виробниче обладнання працює при жорстких умовах експлуатації: температурні навантаження у межах 850–900° С, питомі тиски на деталі до 7–8 МПа, агресивне оточуюче середовище (кисень повітря, виробничий пил з абразивною властивістю, випаровувань лаків та інших технологічних середовищ, тощо).

У цих умовах забезпечити конкурентність нової техніки, зробити так, щоб нові технологічні комплекси були спроможні задовольняти безперервно зростаючі потреби споживачів і, особливо, характеристики довговічності та зносостійкості, можливо за допомогою створення нових конструкційних матеріалів та широкого їх застосування при виготовленні деталей і, в першу чергу, деталей тертя, які здебільшого не спроможні забезпечити безвідмовну довгострокову роботу техніки за умов дії жорстких умов експлуатації. Деталі тертя виходять з ладу, збільшується кількість простоїв складного обладнання, суттєво зростають витрати на текучі ремонти.

Авторами статті в останні роки було створено нові високоносостійкі композитні сплави, які синтезовані з промислових відходів інструментальних сталей та нікелю, що є цінною і дешевою сировиною та які, на жаль, навіть на сьогодні, здебільшого, вивозяться у відвали і не використовуються у повторному циклі виробництва. У складі цих відходів є гостро-

дефіцитні для промисловості України матеріали, такі як вольфрам, ванадій, молібден, титан, кобальт, іридій, нікель, ніобій та інші. На основі розгалужених науково-дослідних робіт з регенерації та повторного використання у виробничому циклі цих сировинних ресурсів створені оригінальні високоносостійкі композиційні матеріали на основі використання відходів високолегованих штампових та швидкорізальних інструментальних сталей 11P3AM3Ф2, 7XГ2ВМФ, 5XB3МФС, P6M5K5, а також на основі відходів виробництва деталей з нікелевих сплавів у електротехнічній, радіотехнічній, електронній та аерокосмічній галузях промисловості типу ХН55ВТКЮ, ХН50ВТФКЮ [1–7]. Вони пройшли всебічну перевірку, захищені патентами України і набули широкого розповсюдження у промисловості, зокрема, при виготовленні деталей тертя швидкісних поліграфічних машин (ротаційної друкарської техніки, ножових, різальних машин, висікального обладнання паперу та картону), а також деталей машин легкої та харчової промисловості, компресорних станцій газогонів та інше).

Відомо, що зносостійкість деталей, як один із головних параметрів надійності обладнання суттєво залежить від параметрів якості поверхонь тертя і, у першу чергу, від шорсткості та фізико-механічних властивостей поверхонь шару. Ці параметри формуються на фінішних операціях тонкого абразивного оброблення.



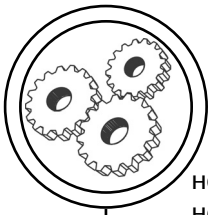
Незважаючи на те, що нові високозносостійкі композиційні матеріали на основі інструментальних сталей і нікелю були створені відносно нещодавно і набули широкого розповсюдження у промисловості в останні 10–15 років, науковцями на сьогодні отримані експериментально перевірені рекомендації для виробництва по широкому колу технологічних надтонких оздоблювально-викінчувальних процесів фінішного оброблення поверхонь деталей тертя поліграфічних машин. Детально досліджені технологічні процеси тонкого абразивного, алмазного, ельборового, кубонітового та боразонового шліфування, а також прецизійна машинна доводка плоских поверхонь, кінцево-оздоблювальне хонінгування прецизійних отворів та високопрецизійне суперфінішування зовнішніх циліндричних поверхонь деталей обертання [2, 4–7, 32–39]. Отримано залежності параметрів шорсткості поверхні R_a , ступеня наклепу K та глибини h його проникнення у тіло деталі від режимів різання, складу і структури абразивного інструменту, його зернистості, типу зв'язки, матеріалу зерна абразиву, а також від складу і типу мастильно-охолоджуючої рідини (МОР).

Класична теорія фрикційного зношування деталей тертя машин [2, 3, 6–19, 32–38], акцентує увагу на тому, що крім шорсткості поверхні та параметрів наклепу, на процес тертя і зношування суттєво впливають величина і знак залишкових напружень поверхневих шарів,

що утворюються при зрізанні з поверхонь тертя тонких стружок поодиноким абразивним зерном інструменту і взаємодії при цьому складових сил різання і миттєвих контактних температур на ріжучому лезі абразивного зерна, що формують теплове поле у зоні оброблення.

На жаль, ці процеси до останнього часу недостатньо досліджені і, це, безумовно, впливає на розуміння фізичних процесів, що відбуваються у надтонких шарах деталей тертя, які працюють в умовах щільного контакту у відповідних вузлах і механізмах машин, а також не сприяє призначенню таких режимів абразивного оброблення, які могли б підвищити параметри довговічності і зносостійкості композитних деталей, що виготовлені з новітніх марок матеріалів, синтезованих з відходів інструментальних сталей і виготовлення деталей з нікелевих сплавів.

На жаль, є лише невелика кількість спроб розрахунків залишкових напружень у зоні дії температурних полів безпосередньо у місці їх виникнення на ріжучому лезі абразивного зерна (при зрізанні надтонких стружок з поверхонь композитних деталей) для умов надтонкого абразивного оброблення [2–4, 6, 7, 20–24, 37–39]. Отже, задача вивчення впливу теплового поля на напружений стан поверхневого шару підшипників ковзання, що виготовлені з новітніх високозносостійких композиційних матеріалів, за умов їх тонкого абразивного шліфування є важливою технологічною проблемою, позитив-



не вирішення якої має, безумовно, як наукове, так і, що не менш важливо, практичне значення.

Мета роботи

Метою даної роботи було дослідження впливу температурного поля при тонкому абразивному шліфуванні високозносостійких композитних підшипників ковзання поліграфічних машин на формування залишкових напружень у поверхневих шарах оброблення.

Враховуючи те, що композитні матеріали на основі інструментальних сталей і нікелю є за своєю фізичною сутністю анізотропними сплавами, а, внаслідок відхилень від директивних технологічних рекомендацій з виготовлення заготовок (похибки при підготовці складу сумішей, відхилення від режимів пресування і циклів термооброблення), постійно існує загроза утворення зародків мікротріщин на поверхнях тертя, то досить цікавим є розрахунок інтенсивності напружень поблизу зародків тріщин у заготовках підшипників ковзання з нових високозносостійких композитів.

Крім того, безумовно корисними є спроби вивчення впливу теплового розширення на напружений стан поверхонь оброблення за допомогою методу граничних елементів, результати яких також були однією із задач даної роботи.

Результати проведених досліджень

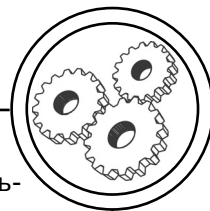
Експериментальні дослідження виконувались на прецизійному шліфувальному вер-

статі SS-125 фірми «Werkzajt» (ФРН) абразивними кругами з електрокорунда хромчастого 33AM28CM1Гл на еластичній гліфталевій зв'язці (Гл) із вмістом у складі абразиву до 1,8–2 % оксиду хрому CrO. Усі досліді (у відповідності з рекомендаціями, наведеними у роботах [2, 4–7]) здійснені з наступними режимами різання — швидкість шліфувального круга $V_{кр} = 45$ м/с, швидкість виробу $V_B = 45$ об./хв., подача $S = 20$ мм/хід, глибина різання $t = 0,020$ мм.

Дослідження виконувались на зразках з композитів на основі інструментальних сталей 7ХГ2ВМФ, 11Р3АМЗФ2, 5ХВ3МФС та відходів нікелевих сплавів ХН55ВМТКЮ і ХН50ВТФКЮ [1–7].

Розрахунки напружень здійснювались з використанням відомих математичних методів скінченних та граничних елементів [22, 23, 25–31]. До речі, у роботах [27, 30] ці методи успішно були застосовані до аналізу анізотропних тіл із зародками тріщин при їх механічному навантаженні.

Проте, при вивченні впливу теплового розширення на напружений стан тіл за допомогою методу граничних елементів (МГЕ), у числовій схемі слід обчислювати додатковий об'ємний інтеграл, що часто нівелює усі переваги МГЕ. У випадку ізотропного тіла цей об'ємний інтеграл можна перетворити до граничного. Саме такий спосіб було використано у роботах [28, 29] при дослідженнях термopружної рівноваги ізотропних тіл з зародками тріщин. Однак, у



випадку анізотропних тіл, якими і є новітні зносостійкі композити, що синтезовані на основі інструментальних сталей та відходів нікелевих сплавів зведення об'ємного інтегралу до поверхневого стає досить громіздким завданням. У роботі [21] для випадку неоднорідних ортотропних площин, півплощин та смуг задача термопружності зведена до інтегрального рівняння Вольтера [25–28]. Для вирішення задачі у випадку, який передбачає розбиття зайнятої тілом області на окремі ділянки, у кожній з яких температура апроксимується поліномом. У працях [29–31] запропоновано алгоритм перетворення об'ємного інтегралу до контурного. Цей підхід успішно використано при аналізі термонапруженого стану анізотропних тіл із зародками тріщин у роботах [30, 31].

Тому у даній статті запропоновано напіваналітичний скінченноелементний підхід аналізу задач термопружності структурно неоднорідних тіл.

Загальна постановка задачі термопружності для неоднорідного ізотропного тіла у випадку, якщо деформації зумовлені лише змінами у часі температурного поля, тобто механічні навантаження стабільні, а саме це маємо при тонкому шліфуванні [21–31], полягає у наступному.

Необхідно визначити 16 функцій координат x_k та часу, а саме: шість компонент тензору напружень σ_{ij} , шість компонент тензору деформацій ε_{ij} , три компоненти вектору переміщень u_i

та температуру T , що задовольняють умовам:

1) трьом рівнянням рівноваги

$$\sum \partial \sigma_{ij} / \partial x_j = 0;$$

2) рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t},$$

де λ_i — коефіцієнт теплопровідності тіла; c — питома теплоємність тіла; $C = c\rho$ — об'ємна теплоємність тіла.

3) шість співвідношень між напруженнями та деформаціями

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + [\lambda\varepsilon_{kk} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T(T - T_0)]\delta_{ij},$$

де α_T — коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу; λ та μ — коефіцієнт Ламе; T_0 — початкова температура тіла.

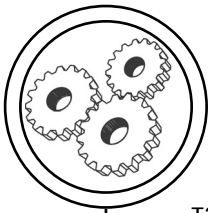
Коефіцієнти λ та μ пов'язані з технічними характеристиками матеріалу рівностями:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

де E — модуль пружності (модуль Юнга), ν — коефіцієнт Пуансона.

4) шість співвідношень між деформаціями та переміщеннями.

Коефіцієнт теплопровідності, питома теплоємність, густина, коефіцієнт лінійного теплового розширення та коефіцієнти Ламе матеріалу вважаємо неперервними функціями просторових координат.



Спираючись на експериментальні дані [21–23] подальші розрахунки (стосовно композитів на основі відходів інструментальних сталей та деталей зі сплавів нікелю) доцільно виконувати за схемою по роботах [24–28], при цьому вважаємо, що

1) модуль Юнга є функцією температури та пористості

$$E(T, \rho) = E_0(1 + \alpha_1\rho + \alpha_2\rho^2) \cdot (1 + \beta_1T + \beta_2T^2 + \dots), \quad (1)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ — коефіцієнти, що отримані експериментально;

2) коефіцієнт теплопровідності матеріалу вважаємо залежним від температури та пористості [22, 23]:

$$\lambda(T, \rho) = \lambda_0 \sqrt{(1-\rho)^3} \cdot (1 + \beta_1T + \beta_2T^2 + \dots), \quad (2)$$

де β_1, β_2 — емпіричні коефіцієнти. У наведеній формулі в основі лежить теплопровідність скелету пористого тіла. Власне пори у широкому діапазоні температур практично відсутні.

3) коефіцієнт лінійного розширення матеріалу є функцією температури і не залежить від пористості. Основою для такого твердження є той факт, що від теплової взаємодії розширюється скелетна частина матеріалу як суцільного тіла, величиною пор (порожнечі) при цьому нехтуємо. На основі експериментальних даних [21–23] отримуємо формулу $\alpha(T) = \alpha_0(1 + \alpha_1T + \alpha_2T^2 + \dots)$. При цьому середній коефіцієнт лінійного роз-

ширення у робочому діапазоні температур:

$$a_{cp} = \frac{1}{T - T_0} \int_{T_0}^T a(\tau) d\tau. \quad (3)$$

4) у випадку внутрішнього тепловиділення для потужності теплового джерела приймемо залежність [21]:

$$W(T, P) = W_0(1 - P)(1 + \gamma_1T + \gamma_2T^2 + \dots). \quad (4)$$

Наближені гіпотези, що описують фізико-механічний стан матеріалу, дають можливість підходити до вирішення задач з позицій механіки неоднорідних матеріалів суцільних тіл, властивості яких корельовано на пористість.

Розглянемо задачу теплопровідності для порожнинного циліндру з радіально змінною пористістю. Тепловий режим приймаємо нестационарним. Розв'язок задачі теплопровідності зводиться до інтегрування нелінійного диференціального рівняння [21]:

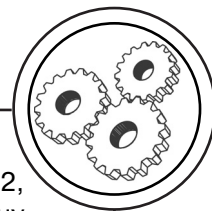
$$\frac{d}{dr} \left[\lambda(T, P) \frac{dT}{dr} \right] + \frac{\lambda(T, P)}{r} \frac{dT}{dr} + W(T, P) = 0 \quad (5)$$

з граничними умовами

$$\begin{aligned} T &= T_1 \text{ при } r = R_1 \\ T &= T_2 \text{ при } r = R_2, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\lambda(T, P)$ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу як функція температури та пористості; $P(r)$ — об'ємна пористість; $W(T, P)$ — питома об'ємна потужність джерела тепла.

На основі експериментальних даних [21–23], апрокси-



муємо $\lambda(T, P)$, $W(T, P)$ функціями (2) та (4):

$$\lambda(T, P) = \lambda_0 \sqrt{(1-\rho)^3} \cdot (1 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + \dots),$$

$$W(T, P) = W_0(1 - P)(1 + \gamma_1 T + \gamma_2 T^2 + \dots).$$

Розв'язок нелінійного рівняння із змінними коефіцієнтами (5) будемо шукати по схемі методу послідовних наближень, вихідне рівняння до серії виду:

$$\frac{d}{dr} \left[\lambda^{(m-1)}(r) \frac{dT^{(m)}}{dr} \right] + \frac{\lambda^{(m-1)}(r) dT^{(m)}}{r dr} + W[T^{(m-1)}, P] = 0 \quad m=1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

При $m = 1$ приймаємо $\lambda^0(r) = \lambda_0 \sqrt{(1-\rho)^3}$ та $W^{(0)}(r) = W_0(1-P)$.

При $m > 1$ отримуємо

$$\lambda^{(m)}(r) = \lambda^{(0)}(r) [1 + \beta_1 T_{(m-1)} + \beta_2 T_{(m-2)}^2 + \dots], \quad (8)$$

$$W^{(m-1)}(r) = W^{(0)}(r) [1 + \gamma_1 T_{(m-1)} + \gamma_2 T_{(m-2)}^2 + \dots].$$

Розв'язок граничної задачі (6-7) замінимо еквівалентною варіаційною постановкою з пошуком мінімуму відповідного функціоналу:

$$J_{(m)} = 2\pi l \int_{R_1}^{R_2} \left\{ \frac{\lambda^{(m-1)}(r)}{2} \left[\frac{dT_m}{dr} \right]^2 - T_m W_{m-1}(r) \right\} r dr + \int_S W_s T_m dS + \int_S \frac{\alpha}{2} (T_m^2 - 2T_m T_{m-1} + T_{m-1}^2) dS. \quad (9)$$

Для реалізації мінімуму функціоналу (9) скористаємось методом скінченних елементів [25-28, 40].

Поділимо тіло по радіусу на n кільцевих елементів (рис. 1) та

пронумеруємо їх границі $i = 1, 2, \dots, n + 1$. Позначимо T_i шукану температуру в i -ому вузлі; відповідно отримуємо $T = T_1$ при $i = 1$, $T = T_2$ при $i = n + 1$. Розглянемо два суміжних елементи 1 та 2, що є спільними для вузла i та представимо функціонал J у вигляді суми $J = J_1 + J_2$, де отримуємо:

$$J_1^{(m)} = \int_{r_{i-1}}^{r_i} \left\{ \frac{\lambda^{(m-1)}(r)}{2} \left[\frac{dT_m}{dr} \right]^2 - T_m W^{(m-1)}(r) \right\} r dr + \int_S W_s T_m dS + \int_S \frac{\alpha}{2} (T_m^2 - 2T_m T_{m-1} + T_{m-1}^2) dS \quad (10)$$

$$J_2^{(m)} = \int_{r_i}^{r_{i+1}} \left\{ \frac{\lambda^{(m-1)}(r)}{2} \left[\frac{dT_m}{dr} \right]^2 - T_m W^{(m-1)}(r) \right\} r dr + \int_S W_s T_m dS + \int_S \frac{\alpha}{2} (T_m^2 - 2T_m T_{m-1} + T_{m-1}^2) dS.$$

Інші елементи можна не враховувати оскільки вони не містять вузол i . Множником $2\pi l$ перед інтегралом нехтуємо.

Представимо функцію температури у кожному з елементів лінійним сплайном

$$T_{(i-1, j)} = a_{11} + a_{12}r \quad (11)$$

$$T_{(i, j+1)} = a_{21} + a_{22}r.$$

У останній системі коефіцієнти форми позначені через вузлові температури у вигляді:

$$a_{11} = T_{i-1} - \frac{r_{i-1}}{r_i - r_{i-1}} (T_i - T_{i-1});$$

$$a_{12} = \frac{1}{r_i - r_{i-1}} (T_i - T_{i-1}); \quad (12)$$

$$a_{21} = T_i - \frac{r_i}{r_{i+1} - r_i} (T_{i+1} - T_i);$$

$$a_{22} = \frac{1}{r_{i+1} - r_i} (T_{i+1} - T_i).$$

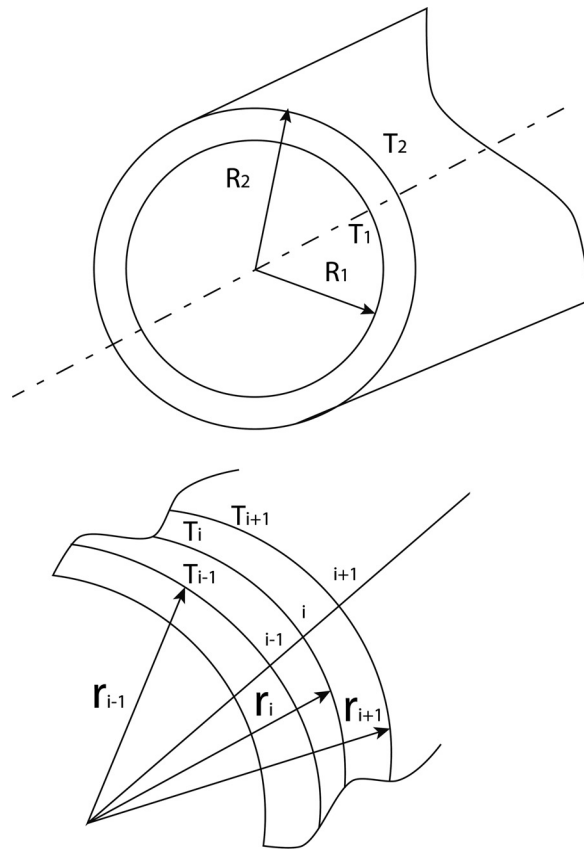
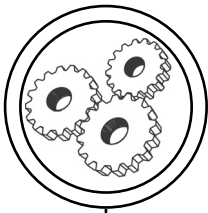


Рис. 1. Схема поділу втулки підшипника ковзання на скінченні елементи по радіусу

Представимо функціонали де було прийнято $J_1^{(m)}, J_2^{(m)}$ у вигляді:

$$\begin{aligned}
 J_1^{(m)} = & \int_{r_{i-1}}^{r_i} \left\{ \frac{1}{2} \lambda_i^{(m-1)} \left[\frac{dT_{(i-1,j)}^{(m)}}{dr} \right]^2 - (\alpha_{11} + \alpha_{12}r) W_1^{(m-1)} \right\} r dr + \\
 & + \int_S W_s (\alpha_{11} + \alpha_{12}r) dS + \int_S \frac{\alpha}{2} \left((\alpha_{11} + \alpha_{12}r)^2 - \right. \\
 & \left. - 2(\alpha_{11} + \alpha_{12}r) T_0 + T_0^2 \right) dS \\
 J_2^{(m)} = & \int_{r_i}^{r_{i+1}} \left\{ \frac{1}{2} \lambda_{i+1}^{(m-1)} \left[\frac{dT_{(i,j)}^{(m)}}{dr} \right]^2 - (\alpha_{21} + \alpha_{22}r) W_2^{(m-1)} \right\} r dr + \\
 & + \int_S W_s (\alpha_{21} + \alpha_{22}r) dS + \\
 & + \int_S \frac{\alpha}{2} \left((\alpha_{21} + \alpha_{22}r)^2 - 2(\alpha_{21} + \alpha_{22}r) \cdot \right. \\
 & \left. + (\alpha_{11} + \alpha_{12}r) + (\alpha_{11} + \alpha_{12}r)^2 \right) dS,
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

$$\lambda_1^{(m-1)} = \frac{\lambda_i^{(m-1)} + \lambda_{i-1}^{(m-1)}}{2},$$

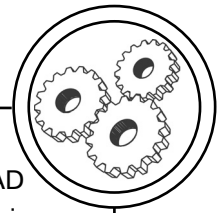
$$W_1^{(m-1)} = \frac{W_i^{(m-1)} + W_{i-1}^{(m-1)}}{2}.$$

Відповідно заміною індексів можна отримати λ_2, W_2 .

Умовою екстремуму функціоналу J буде

$$\frac{\partial J}{\partial T_i} = \frac{\partial J_1}{\partial T_i} + \frac{\partial J_2}{\partial T_i} = 0. \tag{14}$$

Виконавши відповідні операції з функціоналами та на ос-



нові (12–14) отримаємо алгебраїчну систему рівнянь відносно вузлових температур для m -ого наближення

$$T_i^{(m)} = \frac{1}{A} [B_i T_{i+1}^{(m)} + C_i T_{i-1}^{(m)} + D_i], \quad (15)$$

де позначено

$$\begin{aligned} A_i &= B_i + C_i; \\ B_i &= \frac{\lambda_1^{(m-1)}}{2} \left[\frac{r_i + r_{i+1}}{r_{i+1} - r_i} \right]; \\ C_i &= \frac{\lambda_2^{(m-1)}}{2} \left[\frac{r_{i-1} + r_i}{r_i - r_{i-1}} \right]; \\ D_i &= -\frac{W_1^{(m-1)}}{6} [2r_i^2 - 2r_{i+1}^2 - r_i r_{i+1}] - \\ &\quad - \frac{W_2^{(m-1)}}{6} [r_i r_{i-1} + r_{i-1}^2 - 2r_i^2]. \end{aligned} \quad (16)$$

При дослідженні тіл із зародками тріщин для врахування кореневої особливості при реалізації цієї схеми використовуються квадратичні сплакни і зміщення вузлів у скінченних елементах у вершині тріщин на четвертину довжини елемента [25–28]. Розглянемо типовий приклад, який час від часу має місце у ході виробництва поліграфічної техніки.

Тріщина у скінченній анізотропній пластині. Розглянемо анізотропну прямокутну пластинку з центральною тріщиною (рис. 2). Ширина пластинки W , а її висота — $4W$. Довжина тріщини — $2a$, а кут її нахилу до осі Ox_1 — γ . Пластинка виготовлена з композиту 11РЗАМЗФ2 на основі інструментальної сталі [1, 3] з такими властивостями: $E_{11} = 65$ ГПа, $E_{22} = 31$ ГПа, $\nu_{12} = 0,21$, $G_{12} = 11,5$ ГПа, $\alpha_{11} = 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\alpha_{22} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$,

$k_{11}/k_{22} = 3,61/0,31$. Сторони AD та BC пластини теплоізоляовані. Сторона AB знаходиться при відліковій температурі ($\theta = 0$), а сторона DC охолоджена до температури θ_0 . Крім цього, сторони AB та DC шарнірно закріплені так, що кладові їхніх переміщень уздовж осі Ox_2 дорівнюють нулю.

Результати розрахунку КІН у вершині P та Q тріщин, порівняно із даними роботи [9] подано в табл. 1. У таблиці використано такі позначення: ETM — це «exact transformation method» [9], за якого об'ємний інтеграл перетворюється до контурного у відображеній області; Sup. — superposition approach [9], коли розв'язок отримують шляхом накладання полів теплових та пружних деформацій. Коефіцієнт нормування $K_0 = E_{22} \alpha_{22} \theta_0 \sqrt{\pi a}$. При розбитті методом скінченних елементів використано

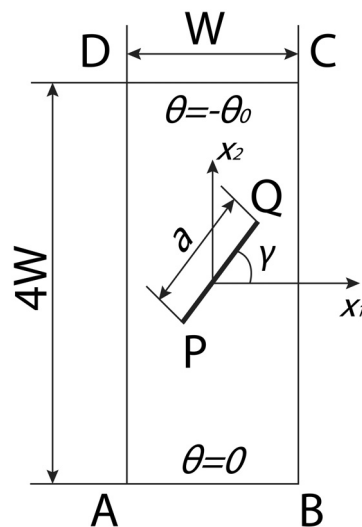
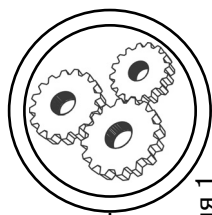


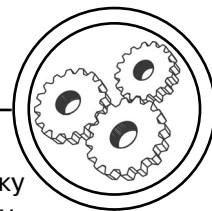
Рис. 2. Нахилена центральна тріщина в анізотропній прямокутній пластині



Таблиця 1

Основні параметри нахиленої тріщини в анізотропній прямокутній пластині

a/W	K _{II} /K ₀ , tip P			K _{II} /K ₀ , tip P			K _{II} /K ₀ , tip P					
	ETM [30]	Sup., [30]	Present	ETM [30]	Sup., [30]	Present	ETM [30]	Sup., [30]	Present			
$\gamma = 0^\circ$												
0,1	0,361	0,357	0,354	0,000	0,000	0,000	0,361	0,357	0,354	0,000	0,000	0,000
0,2	0,371	0,371	0,357	0,000	0,000	0,001	0,371	0,371	0,357	0,000	0,000	-0,001
0,3	0,367	0,362	0,361	0,001	0,001	0,001	0,367	0,362	0,361	0,001	0,001	-0,001
0,4	0,372	0,369	0,367	0,002	0,001	0,001	0,372	0,369	0,367	0,002	0,001	-0,001
0,5	0,381	0,379	0,376	0,002	0,002	0,002	0,381	0,379	0,376	0,002	0,002	-0,002
$\gamma = 30^\circ$												
0,1	0,268	0,269	0,267	0,161	0,155	0,153	0,269	0,270	0,267	0,159	0,152	0,152
0,2	0,275	0,275	0,272	0,159	0,153	0,153	0,274	0,274	0,271	0,157	0,152	0,151
0,3	0,282	0,282	0,280	0,158	0,153	0,152	0,281	0,281	0,278	0,155	0,150	0,149
0,4	0,292	0,292	0,290	0,155	0,151	0,151	0,290	0,291	0,289	0,152	0,148	0,147
0,5	0,305	0,305	0,303	0,154	0,150	0,149	0,303	0,303	0,301	0,149	0,145	0,144
$\gamma = 45^\circ$												
0,1	0,148	0,150	0,179	0,195	0,188	0,178	0,147	0,149	0,178	0,195	0,188	0,177
0,2	0,204	0,205	0,184	0,178	0,172	0,179	0,196	0,199	0,183	0,174	0,168	0,177
0,3	0,219	0,220	0,192	0,181	0,176	0,181	0,208	0,210	0,191	0,174	0,168	0,178
0,4	0,239	0,240	0,202	0,187	0,182	0,183	0,224	0,226	0,201	0,174	0,169	0,179
0,5	0,208	0,209	0,214	0,200	0,197	0,186	0,188	0,190	0,213	0,186	0,183	0,180



адаптивну сітку із 540 вузлами.

Табл. 1 засвідчує добру узгодженість результатів, отриманих запропонованим підходом, із даними [30]. При $\gamma = 45^\circ$ отримано найбільшу розбіжність результатів, що можна пояснити використаною у роботі [30] технікою розбиття на підобласті, що породжує додаткові точки колокації на спільній межі підобластей, яка для кута $\gamma = 45^\circ$ є найбільшою серед усіх розглянутих. Крім цього, обчислені в [30] для $\gamma = 45^\circ$ КІН K_1 різко зростають при збільшенні відносної довжини тріщини a/W від 0,1 до 0,2, а КІН K_{11} для $a/W = 0,1$ більший, ніж для $a/W = 0,2$, а хоча у діапазоні $a/W = 0,2 \dots 0,5$ простежується їхнє монотонне зростання. З огляду на це, надійнішими видаються значення КІН, обчислені запропонованим підходом.

Для ілюстрації інших можливих застосувань запропонованого підходу дослідимо нові задачі.

Розглянемо анізотропну квадратну пластинку з двома паралельними зародками тріщин. Розглянемо анізотропну пластинку зі скловолокна, що містить дві паралельні тріщини (рис. 3). На берегах тріщин відлікова (нульова) температура, а межа пластинки нагріта до температури θ_0 . Береги пластинки та тріщин вільні від механічного навантаження. Отримані значення КІН у правій вершині нижньої тріщини залежно від довжин тріщин та відстаней між ними подано у табл. 2. Усі КІН нормовані до $K_0 = E_{22} a_{22} \theta_0 \sqrt{\pi a}$.

Як і в ізотропному випадку тіла з однією тріщиною, домінуючим при температурних крайових умовах є параметр K_1 . Проте, на відміну від пластинки з одною тріщиною, у випадку двох дефектів ненульовим є також і параметр K_{11} . Це зумовлено взаємодією тріщин. Проте K_{11} на порядок менший за K_1 , тому при розрахунку міцності таких пластинок ним можна знехтувати.

Із табл. 2 видно, що нормовані показники K_1/K_0 зменшуються зі збільшенням довжини тріщини та з віддаленням тріщин одна від одної (хоча сам показник K_1 збільшується). У випадку довгих тріщин відстань між ними практично не впливає на K_1 , що зумовлено збільшенням впливу країв пластинки. За таких же довжин тріщин не простежується монотонної залежності K_1 від відстані $2d$ між тріщинами. Максимуми K_1 спостерігаються для $d/W \approx 0,2$.

Висновки

Узагальнюючи комплекс виконаних досліджень необхідно зробити наступні висновки.

1. Вперше у науковій практиці виконано теоретико-експериментальне дослідження температурного поля підшипників ковзання поліграфічних машин з вискозносостійких композитів на основі інструментальних сталей типу 7ХГ2ВМФ, 11РЗАМЗФ2, 5ХВЗМФС та відходів нікелевих сплавів ХН55ВМТКЮ і ХН50ВТФКЮ з аналізом формування напружень у поверхневих шарах дета-

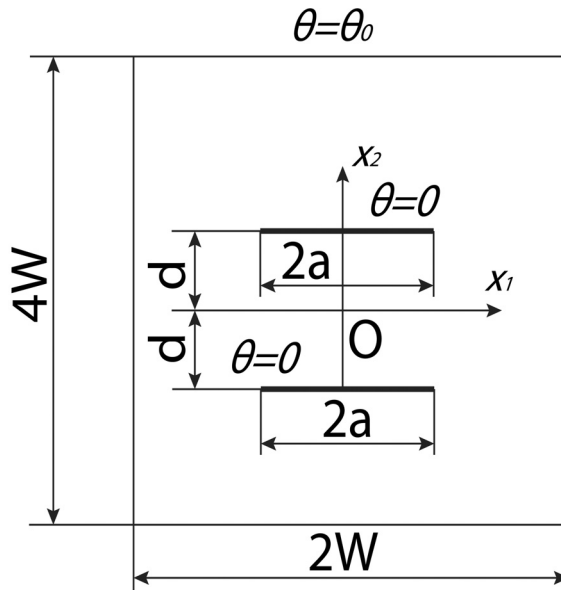
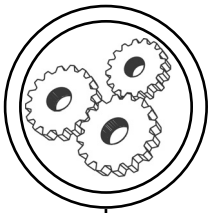


Рис. 3. Анізотропна пластинка з двома зародками тріщин

лей тертя за умов їх тонкого абразивного шліфування.

2. Запропонована методика та повний варіаційний функціонал можуть бути прийнятими за основу для розробки алгоритмів та схем наближеного розв'язування відповідних крайових задач з використанням варіаційних методів.

3. Отримані співвідношення варіаційного формування крайових задач є вихідними для ітераційної побудови двомірних та

одномірних математичних моделей термомеханіки елементів конструкцій кілець композитних підшипників ковзання.

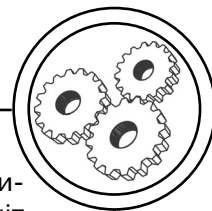
4. На підставі запропонованого функціоналу отримана схема методу скінченних елементів, яка виявила добру узгодженість результатів досліджень з відомими даними при вивченні структурно неоднорідних анізотропних тіл із тріщинами.

5. Подальші дослідження доцільно виконувати, вивчаючи ут-

Таблиця 2

Основні параметри зародків тріщини в анізотропній пластинці з двома тріщинами

d/W	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35	0,1	0,2	0,25	0,3	0,35
a/W	K ₁ /K ₀					K ₂ /K ₀				
0,1	0,175	0,183	0,177	0,170	0,162	0,001	-0,005	-0,005	-0,005	-0,005
0,2	0,153	0,164	0,162	0,157	0,149	0,006	-0,005	-0,008	-0,008	-0,008
0,3	0,142	0,153	0,151	0,147	0,141	0,007	-0,005	-0,008	-0,009	-0,010
0,4	0,135	0,145	0,143	0,139	0,134	0,007	-0,006	-0,009	-0,010	-0,010
0,5	0,130	0,137	0,136	0,133	0,129	0,005	-0,007	-0,009	-0,009	-0,008
0,6	0,124	0,128	0,127	0,125	0,123	0,002	-0,009	-0,009	-0,007	-0,006
0,7	0,116	0,117	0,116	0,116	0,115	-0,003	-0,010	-0,008	-0,004	-0,002

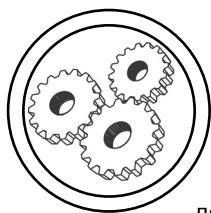


ворення теплових напружень у поверхневих шарах підшипників ковзання (для умов їх тонкого абразивного шліфування), щоб були виготовлені з найновітніших антифрикційних ма-

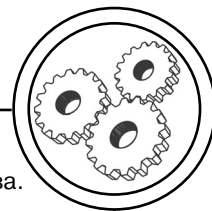
теріалів — таких, як диборид титану, композитів типу сапоніт титану та сапоніт алюмінію, порошкових сплавів на основі гідриду титану та боридів цирконію.

Список використаної літератури

1. Роїк Т. А. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації : монографія / Т. А. Роїк, П. О. Киричок, А. П. Гавриш. — К. : НТУУ «КПІ», 2007. — 404 с.
2. Киричок П. О. Технологія поліграфічного машинобудування : навчальний посібник / П. О. Киричок, Т. А. Роїк, А. В. Шевчук, А. П. Гавриш, О. І. Лотоцька. — К. : НТУУ «КПІ», 2014. — 504 с.
3. Роїк Т. А. Новітні композиційні матеріали деталей тертя поліграфічних машин : монографія / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк. — К. : НТУУ «КПІ», 2014. — 427 с.
4. Киричок П. О. Фінішне оброблення зносостійких деталей друкарських машин : навч. посіб. / П. О. Киричок, Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, А. В. Шевчук, Ю. Ю. Віцюк. — К. : НТУУ «КПІ», 2014. — 404 с.
5. Аскеров М. Г. Металлополимерные триботехнические материалы : монографія / М. Г. Аскеров, Т. А. Роїк, А. П. Гавриш. — К. : НТУУ «КПІ», 2015. — 218 с.
6. Гавриш О. А. Новітні технології виробництва стандартизованих виробів : монографія / О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк, Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, С. В. Войтко. — К. : НТУУ «КПІ», 2012. — 204 с.
7. Роїк Т. А. Сучасні системи технологій заготівельного виробництва в машинобудуванні : монографія / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. А. Гавриш. — К. : Вид-во ЕКМО, 2010. — 210 с.
8. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин / Б. И. Костецкий. — М. : Машиностроение, 1950. — 166 с.
9. Костецкий Б. И. Надежность и долговечность машин / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, Л. И. Бершадский, А. К. Караулов. — К. : Техніка, 1975. — 408 с.
10. Костецкий Б. И. Основные вопросы теории трения и изнашивания деталей машин / Б. И. Костецкий. — М. : Машгиз, 1955. — 152 с.
11. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении / Б. И. Костецкий, И. Г. Носовский, А. К. Караулов и др. — К. : Наукова думка, 1982. — 126 с.
12. Костецкий Б. И. Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. — К. : Техника, 1970. — 396 с.
13. Крагельский И. В. Коэффициенты трения / И. В. Крагельский, И. Э. Виноградов. — М. : Машгиз, 1962. — 186 с.
14. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — М. : Машиностроение, 1977. — 526 с.
15. Крагельский И. В. Развитие науки о трении / И. В. Крагельский, В. С. Щедров. — М. : Изд-во АН СССР, 1956. — 235 с.
16. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. — М. : Машиностроение, 1968. — 478 с.
17. Крагельский И. В. Трение и износ в машинах / И. В. Крагельский. — М. : Машгиз, 1962. — 284 с.



18. Рыжов Э. В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. — К. : Наукова думка, 1984. — 340 с.
19. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин : монография / Э. В. Рыжов. — К. : Наукова думка, 1987. — 320 с.
20. Гавриш А. П. Формування залишкових напружень під час шліфування композиційних матеріалів для поліграфічної техніки / А. П. Гавриш, Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. І. Лотоцька, Ю. Ю. Віцюк // Вісник Житомирск. технологічн. ун-ту. — 2014. — № 3(70). — С. 17–26.
21. Беляев И. М. Проекционные и разностные методы в задачах теплообмена и термоупругости / И. М. Беляев, В. И. Завелион, А. А. Рядно. — Днепропетровск : Изд-во ДГУ, 1982. — 140 с.
22. Боли Б. Теория температурных напряжений / Б. Боли, Дж. Уэйнер. — М. : Мир, 1964. — 517 с.
23. Био М. Вариационные принципы в теории теплообмена / М. Био. — М. : Энергия, 1975. — 208 с.
24. Кошелюк В. А. Застосування МСЕ до розв'язування задач термопружності структурно-неоднорідних тіл / В. А. Кошелюк // Наукові нотатки. — Вид. ЛНТУ. 2015. — № 49. — С. 86–92.
25. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике / под ред. Г. Гроше, В. Циглера; перевод с нем. — Лейпциг : Изд-во «Тойбнер»; М. : Главн. ред. физико-матем. лит-ры, 1981. — 719 с.
26. Математическая энциклопедия. — М. : Советская энциклопедия. — 1977. — Том 1. — 620 с.; Том 2, 1979. — 537 с.
27. Кудрявцев Л. Д. Математический анализ в двух томах / Л. Д. Кудрявцев. — М. : Высшая школа, 1980. — 435 с.
28. Владимиров В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров. — М. : Наука, 1976. — 520 с.
29. Pan E. A general boundary element analysis of 2D linear elastic fracture mechanics // Int. J. Fract. — 1977. — № 88. — P. 41–59.
30. Shiah Y. C. Fracture mechanics in 2-D anisotropic thermoelasticity using BEM / Y. C. Shian, C. L. Tan. — CMES. — 2000. — Vol. 1. — № 3. — P. 91–99.
31. Sollero P. Anisotropic analysis of cracks in composite laminates using the dual boundary element method / P. Sollero, M. H. Alibadi // Composite structures. — 1995. — № 31. — P. 229–233.
32. Гавриш А. П. Фінішна алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів : монографія / А. П. Гавриш, П. П. Мельничук. — Житомир : Вид-во Житомирськ. державн. технологічн. ун-ту (ЖДТУ), 2004. — 551 с.
33. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. — М. : Машиностроение, 1974. — 320 с.
34. Ящерицын П. И. Прогрессивная технология финишной обработки деталей / П. И. Ящерицын. — Минск : Беларусь, 1989. — 312 с.
35. Новиков Н. В. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. акад. НАН Украины Н. В. Новикова, д.т.н. С. А. Клименко. — М. : Машиностроение, 2014. — 607 с.
36. Лаврименко В. І. Надтверді абразивні матеріали в механообробці : Енциклопедичний довідник під заг. ред. акад. НАН України М. В. Новікова. — К. : Вид-во ІНМ НАН України, 2013 — 456 с.
37. Основы теории резания материалов : підручник / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Добросюк, В. М. Залога, Ю. М. Новосьолов, Ф. Я. Якубов; під заг. ред. М. П. Мазура. — Львів : Новий світ, 2010. — 423 с.
38. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : монографія в 6 т. / под общ. ред. акад. Новикова Н. В. — К. : ИСМ им В. Н. Бакуля НАНУ,



2007. — т. 6 : Алмазно-абразивный инструмент / под ред. А. А. Шепелева. — 340 с.

39. Эльбор в машиностроении : монография (В. С. Лысанов, В. А. Букин, Б. А. Глаговский, З. И. Кремень и др.; под. общ. ред. В. С. Лысанова. — Л-д. : Машиностроение, 1978. — 280 с.

40. Сегерлинд Ларри Дж. Применение метода конечных элементов / под. ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1979. — 392 с.

References

1. Roik, T. A. & Kyrychok, P. O. & Havrysh A. P. (2007). *Kompozytsiini pidshyupnykovi materialy dlia pidvyshchennykh umov ekspluatatsii [Composite bearing materials for elevated operating conditions]*. Kyiv: NTUU 'KPI' [in Ukrainian].

2. Kyrychok, P. O. & Roik, T. A. & Shevchuk, A. V. & Havrysh, A. P. & Lototska, O. I. (2014). *Tekhnolohiia polihrafichnoho mashynobuduvannia [Technology of printing machinery]*. Kyiv: NTUU 'KPI' [in Ukrainian].

3. Roik, T. A. & Havrysh, A. P. & Kyrychok, P. O. & Vitsiuk, Iu. Iu. (2014). *Novitni kompozytsiini materialy detalei tertia polihrafichnykh mashyn [The latest composite materials of the friction pieces for printing machines]*. Kyiv: NTUU 'KPI' [in Ukrainian].

4. Kyrychok, P. O. & Roik, T. A. & Havrysh, A. P. & Shevchuk, A. V. & Vitsiuk, Iu. Iu. (2014). *Finishne obroblennia znosostiikykh detalei drukarskykh mashyn [Finish machining of wear parts of printing machines]*. Kyiv: NTUU 'KPI' [in Ukrainian].

5. Askerov, M. G. & Roik, T. A. & Gavrish, A. P. (2015). *Metallopolimernye tribo tehnicheskie materialy [Metal-polymer tribological materials]*. Kiev: NTUU 'KPI' [in Russian].

6. Havrysh, O. A. & Vitsiuk, Iu. Iu. & Roik, T. A. & Havrysh, A. P. & Voitko, S. V. (2012). *Novitni tekhnolohii vyrobnytstva standartyzovanykh vyrobiv [The latest technology of production of standardized products]*. Kyiv: NTUU 'KPI' [in Ukrainian].

7. Roik, T. A. & Havrysh, A. P. & Havrysh, O. A. (2010). *Suchasni systemy tekhnolohii zahotivelnoho vyrobnytstva v mashynobuduvanni [Modern systems blanking production technologies in mechanical engineering]*. Kyiv: Vyd-vo EKMO [in Ukrainian].

8. Kosteckij, B. I. (1950). *Iznosostojkost' detalej mashin [The wear resistance of machine parts]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].

9. Kosteckij, B. I. & Nosovskij, I. G. & Bershadskij, L. I. & Karaulov, A. K. (1975). *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin [The reliability and durability of machines]*. Kiev: Tekhnika [in Russian].

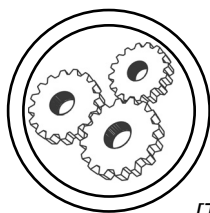
10. Kosteckij, B. I. (1955). *Osnovnye voprosy teorii trenija i iznashivaniya detalej mashin [Main questions of the theory of friction and wear of machine parts]*. Moscow: Mashgiz [in Russian].

11. Kosteckij, B. I. & Nosovskij, I. G. & Karaulov, A. K. & other (1982). *Poverhnostnaja prochnost' materialov pri trenii [Surface strength of materials during friction]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].

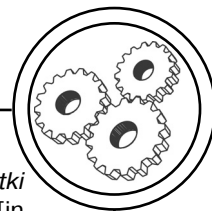
12. Kosteckij, B. I. (1970). *Trenie, smazka i iznos v mashinah [Friction, lubrication and wear in machines]*. Kiev: Tehnika [in Russian].

13. Kragel'skij, I. V. & Vinogradov, I. Je. (1962). *Koeficienty trenija [The coefficient of friction]*. Moscow: Mashgiz [in Russian].

14. Kragel'skij, I. V. & Dobychin, M. N. & Kombalov, V. S. (1977). *Osnovy raschetov na trenie i iznos [Fundamentals of calculations on friction and wear]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].



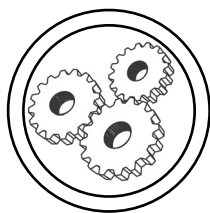
15. Kragel'skij, I. V. & Shhedrov, V. S. (1956). *Razvitie nauki o trenii [The development of the science of friction]*. Moscow: Izd-vo AN SSSR [in Russian].
16. Kragel'skij, I. V. (1968). *Trenie i iznos [Friction and wear]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
17. Kragel'skij, I. V. (1962). *Trenie i iznos v mashinah [Friction and wear in machines]*. Moscow: Mashgiz [in Russian].
18. Ryzhov, Je. V. (1984). *Tehnologicheskie metody povyshenija iznosostojkosti detalej mashin [Technological methods to improve the wear resistance of machine parts]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
19. Ryzhov, Je. V. (1987). *Kontaktnaja zhestkost' detalej mashin [Contact rigidity of machine parts]*. Kiev: Naukova dumka [in Russian].
20. Havrysh, A. P. & Roik, T. A. & Havrysh, A. P. & Lototska, O. I. & Vitsiuk, Iu. Iu. (2014). Formuvannia zalyshkovykh napruzen pid chas shlifuvannia kompozytsiinykh materialiv dlia polihrafichnoi tekhniki [The formation of residual stresses in grinding of composite materials for polygraphic equipment]. *Journal of Visnyk Zhytomyrsk. tekhnolohichn. un-tu — The Bulletin of Zhytomyr Technological University*, 3(70), 17–26 [in Ukrainian].
21. Beljaev, I. M. & Zavelion, V. I. & Rjadno A. A. (1982). *Proekcionnye i raznostnye metody v zadachah teploobmena i termouprugosti [Projection and difference methods in problems of heat transfer and thermoelasticity]*. Dnepropetrovsk: Izd-vo DGU [in Russian].
22. Boli, B. & Ujejnjer Dzh. (1964). *Teorija temperaturnih naprjazhenij [Theory of thermal stresses]*. Moscow: Mir [in Russian].
23. Bio, M. (1975). *Variacionnye principy v teorii teploobmena [Variational principles in the theory of heat transfer]*. Moscow: Jenergija [in Russian].
24. Kosheliuk, V. A. (2015). Zastosuvannia MSE do rozv'iazuvannia zadach termopruzhnosti strukturno-neodnorodnykh til [The use of the MSE to the solution of problems of thermoelasticity of structurally inhomogeneous bodies]. *Journal of Naukovi notatky — Scientific Notes*, 49, 86–92 [in Ukrainian].
25. Bronshtejn, I. N. & Semendjaev, K. A. (1981). *Spravochnik po matematike [Handbook of mathematics]*. Lejpcig: Izd-vo 'Tojbnjer'; Moscow: Glavn. red. fiziko-matem. lit-ry [in Russian].
26. (1977, V. 1), (1979, V. 2). *Matematicheskaja jenciklopedija [Mathematical encyclopedia]*. Moscow: Sovetskaja jenciklopedija [in Russian].
27. Kudrjavcev, L. D. (1980). *Matematicheskij analiz v dvuh tomah [Mathematical analysis in two volumes]*. Moscow: Vysshaja shkola [in Russian].
28. Vladimirov, V. S. (1976). *Uravnenija matematicheskoi fiziki [Equations of mathematical physics]*. Moscow: Nauka [in Russian].
29. Pan, E. (1977). *A general boundary element analysis of 2D linear elastic fracture mechanics*. *Int. J. Fract*, 88, 41–59 [in English].
30. Shiah, Y. C. & Tan, C. L. (2000). *Fracture mechanics in 2-D anisotropic thermoelasticity using BEM*, Vol. 1, 3, 91–99 [in English].
31. Sollero, P. & Alibadi, M. H. (1995). Anisotropic analysis of cracks in composite laminates using the dual boundary element method. *Journal of Composite Structures*, 31, 229–233 [in English].
32. Havrysh, A. P. & Melnychuk, P. P. (2004). *Finishna almazno-abrazyvna obrobka mahnitnykh materialiv [Finish diamond-abrasive treatment of magnetic materials]*. Zhytomyr: Vyd-vo Zhytomyrsk. derzhavn. tekhnolohichn. un-tu (ZhDTU) [in Ukrainian].
33. Maslov, E. N. (1974). *Teorija shlifovanija materialov [Theory of grinding of materials]*. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].



34. Jashhericyn, P. I. (1989). *Progressivnaja tehnologija finishnoj obrabotki detalej* [An advanced technology of finishing of parts]. Minsk: Belarus' [in Russian].
35. Novikov, N. V. (2014). *Instrumenty iz sverhtverdyh materialov* [Tools of superhard materials]. Moscow: Mashinostroenie [in Russian].
36. Lavrymenko, V. I. (2013). *Nadtverdi abrazyvni materialy v mekhanoo-brobsi* [Superhard abrasive materials in the mechanical-processing]. Kyiv: Vyd-vo INM NAN Ukrainy [in Ukrainian].
37. Mazur, M. P. & Vnukov, Iu. M. & Dobrosiuk, V. L. & Zaloha, V. M. & Novosolov, Iu. M. & Yakubov, F. Ia. (2010). *Osnovy teorii rizannia materialiv* [Fundamentals of the theory of cutting of materials]. Lviv: Novyi svit [in Ukrainian].
38. (2007). *Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primenenie. t. 6: Almazno-abrazyvnyj instrument* [Superhard materials. Obtaining and deploying. Vol. 6 Diamond-abrasive tool]. Kiev: ISM im V. N. Bakulja NANU [in Russian].
39. Lysanov, V. S. & Bukin, V. A. & Glagovskij, B. A. & Kremen', Z. I. & other (1978). *Jel'bor v mashinostroenii* [Elbor in machine building]. Leningrad: Mashinostroenie [in Russian].
40. Segerlind, Larri Dzh. (1979). *Primenenie metoda konechnih jelementov* [Application of the finite element method]. Moscow: Mir [in Russian].

В статье представлены результаты теоретико-экспериментального исследования температурного поля подшипников скольжения полиграфических машин из новых высокоизносостойких композитных материалов, синтезированных на основе использования утилизированных и регенерированных отходов производства деталей из инструментальных сталей и никеля типа 11P3AM3Ф2, 7ХГ2ВМФ, 5ХВ3МФС, ХН55ВМТКЮ, ХН50ВТФКЮ, и его влияния на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое композитной детали для условий тонкого абразивного шлифования. Предложен численно-аналитический метод решения задач термоупругости и определения температурного поля структурно-неоднородного тела для случая стабильности силовых параметров резания в зоне формирования напряжений при прецизионном тонком абразивном шлифowaniu. Предложенный метод базируется на методе конечных элементов решения задач термоупругости. Получены зависимости для определения температурного поля и приведены численные примеры их решения для реальных условий производства. Разработаны практические рекомендации по режимам резания при тонком шлифowaniu и выбору параметров абразивных инструментов для промышленности при производстве полиграфических машин.

Ключевые слова: высокоизносостойкие композиционные материалы; тонкое абразивное шлифowanie; параметры качества поверхности; температурное поле зоны резания; термоупругость; структурно-неоднородное тело;



**вариационный функционал; зародыш трещины;
промышленные рекомендации.**

The results of theoretic and experimental research of the temperature field of poligrafic mashins slide bearings made from new wear resistance composite materials, which are sintesized on the base of utilized and regenerated wastes production of parts from instrumental steel and nikel, type 11P3AM3Φ2, 7XГ2BMΦ, 5XB3MΦC, XH55BMTKЮ, XH50BTΦKЮ and its influence on the foration residual stresses in the surface layer of part for conditions thin abrasive grinding have been presented in the article. It have been proposed an analytical method of solution of thermoelasticity problem and determination of temperature field in structurally inhomogeneous solids for chance of stability force parameters of cutting in the zone formation of level stresses at presision thin abrasive grinding. The proposed method uses FEM for solving the thermoelasticity problems. The expressions for determination of the temperature field and the numerical examples are presented for real conditions of production. It were developed the practice recomendations at parameters of cutting at thin grinding and choice parameters of abrasive instruments at production of poligrafic mashines.

Keywords: wear resistance composite materials; thin abrasive grinding; parameters quality of surface; temperature field of zone cutting; thermoelasticity; structurally inhomogeneous solids; variation functional; nucleation of crack; industrial recomendations.

Рецензент — О. М. Величко, д.т.н., с.н.с.,
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 22.09.15