

**ФОРМУВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ  
ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ТЕРТЯ  
КОМПЗИТНИХ ПІДШИПНИКІВ ПОЛІГРАФІЧНИХ МАШИН  
ПРИ ТОНКОМУ АБРАЗИВНОМУ ШЛІФУВАННІ**

© А. П. Гавриш, д.т.н., професор, П. О. Киричок, д.т.н.,  
професор, Т. А. Роїк, д.т.н., професор, Ю. Ю. Віцюк, к.т.н.,  
А. В. Шевчук, д.т.н., професор, НТУУ «КПІ», Київ, Україна

**В статье приведены результаты теоретических исследований формирования остаточных напряжений в поверхностных слоях рабочих поверхностей трения композитных подшипников скольжения для печатных машин, изготовленных из новых износостойких композитных материалов и обработанных методами сверхтонкого абразивного шлифования.**

**In an article the theoretical researches of residual stresses formation in the surface layers of work friction surfaces of composite slider bearings for printing machines which were manufactured from new wear-resistant composite materials and finished by superfine abrasive grinding methods have been presented.**

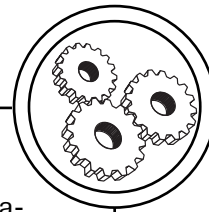
**Постановка проблеми**

Вимоги до деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування, постійно зростають. Це обумовлює необхідність створення та удосконалення існуючих технологій виготовлення деталей такого типу, включаючи синтез нових видів матеріалів та розробку фінішних операцій технологічного процесу надтонкої абразивної обробки робочих поверхонь тертя з забезпеченням відповідних високих вимог до якості оброблення (мінімальних значень параметрів шорсткості поверхонь  $R_a$ , мінімальних спотворень, знаку та значень залишкових напружень, дефектів тонкого поверхневого шару, глибини залягання наклепу, ступеню деформації металу у зоні зрізання стружки

поодиноким абразивним зерном). Ці якості формують умови придатності поверхні оброблення для задоволення високих функціональних вимог експлуатації, зокрема, суттєвого підвищення строків служби машин та механізмів друкарської техніки.

Для реалізації вказаних надскладних завдань нещодавно були створені і почали успішно застосовуватись у поліграфічному машинобудуванні нові композиційні матеріали на основі цінних відходів інструментальних сталей, що придатні працювати у жорстких умовах експлуатації (температури — до 600 °С, тиску — 5–8 МПа) [1–3].

Відомо, що на параметри зносостійкості поверхонь тертя суттєво впливають не тільки па-



раметри шорсткості  $R_a$ , а і, що не менш важливо, фізичні властивості тонкого шару поверхонь оброблення. Ці властивості (з точки зору загальної теорії шліфування) забезпечуються при обробці взаємодією силового та температурного полів на ріжучому лезі абразивного зерна шліфувального інструменту.

Останнім часом були виконані всебічні дослідження формування параметрів шорсткості  $R_a$  та параметрів наклепу тонких поверхневих шарів деталей з композиційних сплавів на основі відходів інструментальних сталей 86Х6НФТ та 4ХМНФС з домішками твердого мастила  $CaF_2$  [4, 5], які виконувались з урахуванням дії силового [6] та температурного [7] полів, що виникають і одночасно діють на лезі кожного абразивного зерна шліфувального інструменту. Взаємодія цих обох полів остаточно забезпечує отримання необхідних параметрів шорсткості та наклепу поверхонь деталей при їх надтонкій обробці абразивним шліфуванням.

На жаль, до цього часу не було виконано досліджень формування залишкових напружень у поверхневих шарах деталей з нових композитних сплавів. Адже відомо, що знак залишкових напружень (стиску, розтягу) та глибина їх розповсюдження суттєво впливають на параметри зносостійкості [8, 9].

Тому, дослідження утворення залишкових напружень у поверхневих шарах деталей тертя з нових композитів при надтонкому абразивному шліфуванні є актуальним питанням, що має наукове та практичне значення.

### Мета роботи

Дослідження залишкових напружень тонкого абразивного шліфування у поверхневих шарах поверхонь тертя композитних підшипників поліграфічних машин, які виготовлені з відходів інструментальних сталей 86Х6НФТ та 4ХМНФС з домішками твердого мастила  $CaF_2$ .

Задачами даного дослідження було:

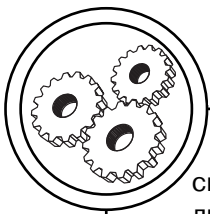
1. Теоретично дослідити механізм формування залишкових напружень з урахуванням дії силових і температурних факторів тонкого абразивного шліфування нових композитних сплавів.

2. Визначити характер дії основних факторів на утворення залишкових напружень.

3. Узагальнити одержані результати і зробити висновки для подальших експериментальних досліджень та розробки промислових рекомендацій.

### Результати проведених досліджень

В процесі поверхневої тонкої абразивної обробки з застосуванням сучасних дрібнозернистих шліфувальних кругів поверхня виробу зазнає впливу термодеформаційних та фізико-хімічних процесів, особливо для умов оброблення з використанням мастильно-охолоджуючих рідин. Термодеформаційні зміни полягають в пружно-пластичному деформуванні металу внаслідок нерівномірності нагрівання поверхні металу і виникненню тимчасових та залишкових внутрішніх напружень. Фізико-хімічні процеси характеризуються фазовими та структурними перетвореннями металу, що



сприяє також виникненню залишкових напружень.

У низці праць [9, 10], присвячених вивченню поверхневого деформування, відмічається, що основна причина зростання міцності та надійності зміцнення деталей полягає в утворенні в їх матеріалі залишкових напружень стиску. Залишкові напруження є важливим параметром, що характеризує фізико-механічний стан твердого тіла і домінуюче впливає на несучу здатність деталей машин.

Напруження, які зрівноважуються всередині твердого тіла після усунення причин (силових і температурних полів), що викликають їх появу, називають залишковими (часом технологічними, внутрішніми або власними). Класифікація залишкових напружень вперше була запропонована М. М. Давиденковим [11] на області дії силового поля. Згідно даної класифікації виникають залишкові напруження I, II та III роду.

Напруження I роду, або макронапруження, зрівноважуються в межах області, що визначається геометричними розмірами деталі. Вони мають орієнтацію, пов'язану з формою деталі і встановлюються за деформацією, що виникає після видалення частини елементів (механічне відрізування), або згідно зміни кристалічної ґратки, що визначається рентгенографічним методом.

Напруження II-го роду (мікронапруження) зрівноважуються в об'ємах одного порядку з розмірами зерен і визначаються за розмитими лініями на рентгенограмах.

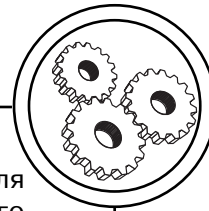
Напруження III-го роду (субмікроскопічні) зрівноважуються в об'ємах порядку елементарної кристалічної ґратки і визначаються за ослабленням інтенсивності ліній вищих порядків на рентгенограмах [8].

Крім того, залишкові напруження поділяються за геометричними ознаками. Так, для деталей циліндричного перерізу залишкові напруження поділяються на осьові  $\sigma_z$ , тангенційні  $\sigma_\theta$  та радіальні  $\sigma_r$ . Такий розподіл зручний для вказування напрямку напружень.

Унаслідок рівномірного нагрівання матеріалу відбувається його довільне розширення. Якщо здійснювати нерівномірне нагрівання тіла, то зв'язки нагрітих ділянок з не нагрітими перешкоджають процесу довільного розширення, і як результат цього — виникнення температурних власних напружень, що існують за умови відсутності зовнішніх прикладених сил.

Температурні напруження, що супроводжують процес тонкого шліфування, прийнято називати тимчасовими напруженнями [8–10], величина яких зберігається в деталі на всіх етапах шліфування. Крім того, технологічний процес, який розглядається в даній роботі, супроводжується багаточисленними мікроударами мікрозерен абразивного круга та їх тертям при контактуванні з поверхнею деталі, що в комплексі створює передумову для змін фізико-механічних властивостей поверхні підшипника ковзання.

В даний час використовуються дві групи методів визначення



залишкових напружень в деталях: фізичні методи та механічні методи. Серед фізичних методів значне поширення отримав рентгенівський, що ґрунтується на вимірюванні параметрів кристалічної ґратки за допомогою явища дифракції рентгенівських променів. Важливим досягненням цього методу є можливість вимірювання нормальних компонентів пружної деформації в будь-якому напрямі еліпсоїду деформацій і на незначних за розміром ділянках поверхневого шару. В той час рентгенівський метод фіксує деформації кристалічної ґратки, що викликані макро- та мікронапруженнями, що погіршує точність визначення залишкових напружень I-го роду [5, 8].

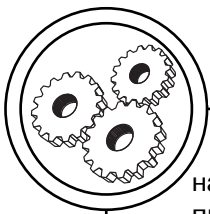
До цієї ж групи слід віднести і ряд наступних методів: поляризаційно-оптичний метод, що оснований на явищі штучного подвійного заломлення променів у прозорих матеріалах під впливом напружень; магнітний, за основу якого прийнятий взаємозв'язок механічних напружень і магнітних властивостей матеріалу (застосовується здебільшого для деталей з ферромагнітних сплавів) [8]; ультразвуковий, що ґрунтується на ефекті впливу залишкових напружень на швидкість поширення ультразвукових коливань.

Усі наведені фізичні методи визначення внутрішніх напружень у комплексі не забезпечують достатньої точності вимірювання і вимагають використання дорогого спеціалізованого обладнання, що обмежує можливість їх широкого практичного

застосування. Крім того, для методу тонкого абразивного шліфування, якому властиве оброблення виробів різноманітних за профілем і матеріалом, застосування фізичних методів ускладнене відсутністю уніфікованих засобів, що не дозволяє одержати точну картину розподілення залишкових напружень на всій товщині матеріалу виробу.

Механічні методи визначення залишкових напружень отримали значне поширення через свою доступність і простоту. Всі механічні методи поділяються на три основні групи: розрахункові, що базуються на розрахунках напружень і деформацій згідно механіки твердого тіла, аналогічно визначенню жорсткості та міцності; експериментальний неруйнівний метод, що ґрунтується на розрахунках залишкових напружень за початковими деформаціями, незалежно від причин їх виникнення; метод експериментального руйнування, в якому залишкові напруження визначаються за деформаціями, що виникають внаслідок розрізування виробу.

З наведених груп механічних методів найточнішими вважаються методи експериментального руйнування, які відрізняються між собою лише формою зразків і способом вимірювання деформацій. В основу даних методів покладено наступний принцип: розрізування або видалення частини тіла із залишковими напруженнями, які еквівалентні напруженням, прикладеним до решти частини тіла із зворотнім знаком і здатним викликати залишкові



напруження. В зв'язку з цим, у процесі визначення напружень I-го роду з достатньо високою точністю застосовувався метод Розенталя-Біргера [12] для матеріалу експериментального зразка.

В більшості наукових праць [8–10] процес утворення внутрішніх напружень внаслідок оброблення пов'язують з тепловими факторами і задача, в основному, зводиться до встановлення величин температурних напружень. Такий теоретичний підхід властивий для процесу шліфування та ряду завершальних технологічних операцій, у яких під час механічного оброблення відсутнє динамічне контактування інструменту з поверхнею виробу. Для даного процесу локальний високотемпературний вплив на поверхню досягається динамічною дією абразивного зерна. Тому основні причини виникнення у поверхневих шарах матеріалу виробу внутрішніх напружень  $\sigma$  слід розглядати комплексно, тобто, як алгебраїчну суму температурних  $\sigma_{T^0C}^H$  динамічних  $\sigma_\partial$  залишкових напружень та напружень  $\sigma_{крс}$ , що виникають внаслідок структурних і фазових перетворень в матеріалі виробу [13–15]:

$$\sigma = \sigma_{T^0C}^H + \sigma_\partial + \sigma_{крс} \cdot (1)$$

У свою чергу температурні напруження визначаються як сума напружень, що виникають унаслідок нагрівання ( $\sigma_{T^0C}^H$ ) та охолодження ( $\sigma_{T^0C}^{ox}$ ) матеріалу оброблення. Тоді останнє отримує вигляд:

$$\sigma = (\sigma_{T^0C}^H + \sigma_{T^0C}^{ox}) + \sigma_\partial + \sigma_{крс} \cdot (2)$$

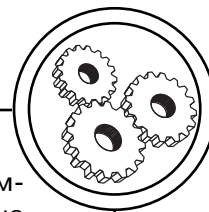
Задача визначення величини і характеру внутрішніх напружень вирішується згідно відомої методики, в основу якої покладений метод розподілення тіла з урахуванням взаємодії шарів поверхні оброблення згідно сумісності їх деформацій [16]. У виведенні формул для розрахунку напружень розглянуто кінцеві моменти часу процесів нагрівання, охолодження та пластичної деформації від динамічного контактування, коли даний час  $t \rightarrow \infty$ .

Якщо, для приладу, розглядати плоску деталь товщиною  $h$ , поверхня якої підлягала процесу тонкого шліфування, то вона може бути представлена складеною з  $n$  пластинок, кожна з яких нагрівається до певної температури. Найвищу температуру під впливом дугового розряду отримує верхній шар (шар  $n$ ), а найменше теплоти припадає на шар I, якнайдалі розташований від місця впливу дугового джерела.

Величину внутрішніх напружень, що виникають лише внаслідок температурного впливу, визначатимемо ґрунтуючись на характерні границі текучості матеріалу оброблення, застосовуючи [17]:

$$\sigma_m = (\Delta_i + \int_0^{h_0} \frac{\Delta_i}{h_0} dy - \int_{h_0}^h \frac{h}{h_0} dy) \frac{E}{1-\mu}, (3)$$

де  $\sigma_m$  — границі текучості матеріалу;



$$h_n = \left[ 1 - 0,5 \left( 1 - \frac{b}{n} \right)^4 \right] \cdot \left( \frac{15}{6} \frac{P_N}{D_\partial} \right)^{0,5}$$

$\Delta_i$  — відносне лінійне розширення вільних шарів матеріалу;  $h_0$  — відстань від опорної основи зразка до шару металу, в якому пружні та пластичні деформації рівні між собою;  $\mu$  — коефіцієнт Пуассона;  $E$  — модуль пружності.

Значення відносного лінійного розширення  $\Delta_i$  визначається алгебраїчною сумою температурних  $\Delta_{T_i}$  та структурних  $\Delta_{стр_i}$  лінійних розширень:

$$\Delta_i = \Delta_{T_i} + \Delta_{стр_i} = (\beta_i T_i) \cdot \left\{ \left[ (\Delta_{стр})_A - (\Delta_{стр})_M \right] \cdot \left[ \left( 1 - \frac{A}{100} \right) T_M - \frac{A}{100} \right] \right\}, \quad (4)$$

де  $\beta_i$  — коефіцієнт відносного лінійного температурного розширення;  $T_i$  — температура  $i$ -го шару металу;  $(\Delta_{стр})_A$ ,  $(\Delta_{стр})_M$  — відносне температурне видовження, відповідно, аустеніту та мартенситу;  $A$  — кількість залишкового аустеніту, що визначається як функція відсоткового вмісту вуглецю і легуючих елементів;  $T_M$  — температура мартенситного перетворення

$$T_M = (T_i - T_M^n) / (T_M^n - T_M^k),$$

де  $T_M^n$ ,  $T_M^k$  — температура, відповідно, початку і кінця мартенситного перетворення.

Як відомо, фазові перетворення описуються фазовою кривою. Обчислення питомого об'єму гетерогенної структури проводиться за допомогою залежності кількості аустеніту, що

розкладається під впливом температури охолодження, згідно методу найменших квадратів.

Величина відносного подовження аустеніту та мартенситу встановлюється на основі відомих залежностей [18]:

$$(\Delta_{стр})_A = 10^{-6} \cdot a_c T - b_c;$$

$$(\Delta_{стр})_M = 10^{-6} \cdot c_c T + d_c,$$

де  $a_c$ ,  $b_c$ ,  $d_c$  та  $d_c = f(C\%)$  — функція від вуглецю, у якій  $C\%$  — відсотковий вміст вуглецю в сталі.

Враховуючи, що для проведення досліджень використовувались композитні зразки з відходів легованих сталей, а в межах однієї групи матеріалів вміст вуглецю коливається в незначних межах, приймаємо  $C\% = \text{const}$ .

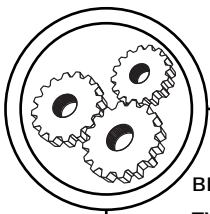
Унаслідок нагрівання поверхні внутрішні напруження виникають за рахунок лише температурної деформації у всіх шарах матеріалу. Тоді величина внутрішніх напружень, застосувавши (3), визначається згідно наступного виразу:

$$\sigma_{T^0C} = \left[ \begin{aligned} & -\beta_i T_i + \int_0^{h_0^H} \beta_i T_i \frac{dy}{h_0^H} - \\ & - \frac{1}{E} \int_{h_0^H}^h \sigma_m \frac{dy}{h_0^H} \end{aligned} \right] \cdot \frac{E}{1-\mu}, \quad (5)$$

де  $\sigma_{T^0C}^H = -\sigma_{T^0C}$  за умови, що

$$(h - Y_i) \geq h_0^H.$$

У процесі охолодження матеріалу внутрішні напруження



виникають за рахунок температурних деформацій нагрітих шарів та відносного їх видовження, що залежить від структурних змін в даних шарах металу. Величина утворених напружень встановлюється згідно (3) та (4) з обов'язковим урахуванням умов, що  $\sigma_{T^{\circ}C}^{ox} = 2\sigma_m$ ;  $(h - Y_1) \geq h_o^{ox}$ , на основі приведеної далі математичної залежності [17], в якій приймається, що  $d_c = (22,4...0,083)C_{\%}$  та  $d_c'' = (0,11...0,018)C_{\%}$ .

$$\sigma_{T^{\circ}C}^{ox} = \left\{ \begin{array}{l} \left[ \beta_1 T_1 + \left[ (10^{-6} \cdot d_c \dot{T}_1 - d_c) - \right. \right. \\ \left. \left. - (10^{-6} \cdot C_c \dot{T}_1 + d_c) \right] \right] \cdot \\ \left[ (1-0,01A) \left( \frac{T_1 - T_M^n}{T_M^n - T_M^k} \right) - \right. \\ \left. - 0,01A \right] \right\} + \\ + \int_0^{h_o^{ox}} \left\{ \beta_1 T_1 + \left[ (10^{-6} \cdot d_c \dot{T}_1 - d_c) - \right. \right. \\ \left. \left. - (10^{-6} \cdot C_c \dot{T}_1 + d_c) \right] \cdot \right. \\ \left. \left[ (1-0,01A) \left( \frac{T_1 - T_M^n}{T_M^n - T_M^k} \right) - 0,01A \right] \right\} \cdot \\ \cdot \left. \frac{dY}{h_o^{ox}} - \frac{2}{h_o^{ox}} \int_0^h \sigma_m \frac{dY}{h_o^{ox}} \right\} \frac{E}{1-\mu} \quad (6)$$

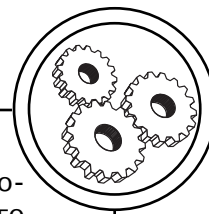
У процесі надтонкої абразивної обробки в матеріалі оброблення виникають внутрішні напруження, як від високотемпературного впливу, так і, як зауважено в формулі (1), внаслідок силового впливу робочих абразивних зерен інструментів.

Енергія взаємодії багаторазово трансформується, утворюючи силове поле, яке властиве поверхневому динамічному зміцненню. Утворене поле,

формує залишкові напруження, які у сукупності з утвореним температурним напруженням приводить до вимушеного відхилення від необхідної геометричної форми — до короблення деталі. Для точного встановлення динамічного напруження необхідно визначити величини силового поля від дії одиночного зерна та змін цього поля під впливом аналогічного деформування оточуючих зон поверхні. Такі дані отримані в роботі [6] і можуть використовуватись у подальших розрахунках і дослідженнях.

В умовах (1) зауважено, напруження від теплового впливу виникатимуть лише внаслідок одержання поверхнею енергії удару зерна, хоча динамічне контактування кожного з елементарних зерен абразиву сприяє виділенню певної кількості теплоти в поверхні деформування, поширюючись на сусідні ділянки матеріалу деталі.

Для розрахунку такого теплового поширення, згідно досліджень М. М. Рикаліна [18], рекомендовано використовувати диференційне рівняння теплопровідності для нестабільного режиму з внутрішнім джерелом теплоти, що пов'язано з складними математичними розрахунками і, з точки зору автора, є недоцільним для теоретичного дослідження процесу тепловиділення та поширення незначної за об'ємом енергоспоживності, адже, виділена таким чином кількість теплоти набагато менша від кількості теплової енергії отриманої внаслідок динамічної дії абразивного зерна.



Вирішення задачі впливу на металеву поверхню миттєвого навантаження (удару) необхідно звести до дослідження напруженодеформованого стану матеріалу (в об'ємі обмеженого призматичного зразка), викликаного дією прикладеного зусилля, яке спрямоване на поверхню вузькою прямолінійною смугою і переміщується зі сталою швидкістю, адже ефекти, що залежні від розмірів зон контактування та розподілення внутрішніх напружень за товщиною, значно ускладнює проведення аналізу картини поверхневого навантаження.

Внутрішні залишкові напруження, згідно прийнятої схеми взаємодії, доцільно визначати виходячи з величини інтенсивності деформації на окремому залишковому еліптичному (у плані) відбитку з наступним перенесенням отриманих результатів на всю оброблену поверхню виробу. Аналіз напруженого стану проводиться у тримірній системі координат: осі X та Y розташовані в площині поверхні зразка і співпадають, відповідно, з великою (a) та малою (b) півосями еліптичного відбитку; вісь Z спрямована у глибину деформованого шару металу.

Еюра відносних залишкових деформацій  $\varepsilon_z = f(z)$  на всій товщині пластично деформованого шару  $h_h$ , під еліптичним відбитком із залишковою глибиною лунки  $h_2$ , описується згідно залежності [19]:

$$\varepsilon_z = -K_1 \frac{h_2}{h_h} \exp\left(-\frac{h}{h_{пл}}\right), \quad (7)$$

де  $K_1$  — коефіцієнт пропорційності, значення якого встановлюється за умови рівності інтенсивності пластичної деформації  $\varepsilon_1$  та заданій залишковій деформації  $\Delta\varepsilon_T$ , що відповідає початку зародження пластичної деформації при напруженні, рівному умовній границі текучості на межі пластично деформованого шару.

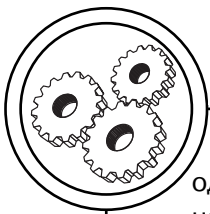
Припустивши, що у точках на осі Z відносні деформації  $\varepsilon_x$  та  $\varepsilon_y$  знаходяться у такому ж співвідношенні, як і середні деформації на поверхні контактного відбитку, тобто, що витримується умова  $p = \varepsilon_x/\varepsilon_y = (b/a)^2$ , та врахувавши постійність об'єму матеріалу даного процесу пластичного деформування ( $\varepsilon_x + \varepsilon_y = -\varepsilon_z$ ) визначаємо коефіцієнти пропорційності:

$$K_1 = \ln \left[ \begin{array}{l} K_1 \cdot \frac{2^{0.5}}{3} \frac{1}{\Delta\varepsilon_T} \frac{h_2}{h_h} \\ \cdot \frac{1}{1+p} (6+8p+5p^2)^{0.5} \end{array} \right]. \quad (8)$$

Технологічні режими обробки та твердість матеріалу оброблення впливають на геометричні розміри поверхневого відбитку, які, в свою чергу, безпосередньо залежать від пружного  $h_{пр}$  та пластичного (залишкового)  $h_{пл}$  деформування поверхні.

Компоненти залишкових напружень  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  згідно відомих компонентів відносних деформацій  $\varepsilon_x$  та  $\varepsilon_y$  визначаються, виходячи з передумови, що при існуванні напруженого складного стану співвідношення між ними описуються аналогічними до





одновісного напруженого стану напруженнями, але з іншими модулями зміцнення.

Згідно узагальненого закону Гука та відношення  $(\epsilon_x/\epsilon_y)$ , отримано наступні залежності між компонентами напружень і власними деформаціями:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_y = \lambda \sigma_x, \text{ де } \lambda = \mu \frac{2+p}{1+p-\mu} \\ \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y} = (1/p) \\ \frac{\epsilon_z}{\epsilon_x} = -[(1+p)/p] \end{array} \right., \quad (9)$$

де за умовами пластичного деформування —  $\mu = 0,5$ , а згідно цього  $\lambda = (2+p)/(1+2p)$ .

Таким чином, застосувавши (7) та (9), отримано залежність для  $\epsilon_i$  для певного значення  $h$ :

$$\epsilon_i = K_1 \xi \frac{h_2}{h_n} \exp\left(-K_1 \frac{h_2}{h_n}\right), \quad (10)$$

$$\text{де } \xi = \frac{2^{0,5} h_2}{3 h_n (1+p)} \cdot (6+8p+5p^2)^{0,5}. \quad (11)$$

Інтенсивність напруження  $\sigma_1$  складного напруженого стану виражається через головні компоненти напружень  $i, y$  у кінцевому випадку, застосувавши наведені вище міркування стосовно умови, що  $\sigma_z = 0$ , отримана залежність функції  $\sigma_i = f(\sigma_x)$  тобто,

$$\sigma_i = 2^{0,5} \cdot \sigma_x (\lambda^2 - 2\lambda + 2)^{0,5}. \quad (12)$$

Визначення  $\sigma_1$ , іншим методом, використовуючи залежності від відносних деформацій  $\epsilon_1$  у межах пружних і пластичних

деформацій, тобто, згідно лінійного  $\sigma_1 = -E_n \epsilon_1$  та ступеневого  $\sigma_1 = -K_n \epsilon_1^n$  законів зміцнення ( $E_n$  та  $K_n$  — модулі, відповідно, пружного і пластичного деформування) з врахуванням (7, 8) для області пластичного деформування

$$\sigma_\partial = \sigma_{i_{\max}} \exp\left(-K_1 n \frac{h_2}{h_n}\right), \quad (13)$$

причому

$$\sigma_{(i_{\max})} = -M_n \cdot (K_1 \xi h_2 / h_n)^n; \quad (14)$$

$$M_n = M(4l/3 + (p + p^2)/p)^{(n/2)} \cdot (1 - \lambda + \lambda^2)^{0,5}; \quad (15)$$

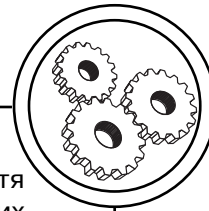
$$h_n = \left[ 1 - 0,5 \left( 1 - \frac{b}{b} \right)^4 \right]. \quad (16)$$

$$\cdot \left( \frac{15 P_N}{6 H_{D_\partial}} \right)^{0,5},$$

де  $H_{D_\partial}$  — динамічна пластична твердість матеріалу обробки;  $n$  і  $M$  — відповідно, показник ступеню та постійний коефіцієнт ступеневої залежності зміцнення матеріалу у його пластичній області, значення якого встановлюється за умови проходження апроксимуючої кривої  $\sigma = M \epsilon^n$  через точки умовної межі текучості матеріалу ( $\sigma_{02}, \epsilon_{02}$ ) та межі міцності ( $\sigma_B, \epsilon_{02}$ ).

Розрахунок компонентів напружень  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  у поверхневому шарі товщиною  $h_i$  проводиться за (9) та (12), визначивши заздалегідь інтенсивність відносних деформацій  $\epsilon_i$  та напружень  $\sigma_i$ .

Підставляємо отримані вище визначення (5), (6) та (12) у вираз (8) без врахування  $\sigma_{крс}$ , оскільки внутрішні напруження в



матеріалі від структурних і фазових перетворень враховані в залежності, яка визначає напруження в процесі охолодження  $\sigma_{T^0C}^{ox}$  і одержуємо остаточний сумарний вираз для розрахунку внутрішніх напружень, що виникатимуть в матеріалі деталі. Запропонована методика є моделлю математичного прогнозування процесу формування внутрішніх напружень, що супроводжує процес тонкого абразивного шліфування поверхонь підшипників ковзання з нових зносостійких високолегованих композитних сплавів. Ці розрахунки дозволяють заздалегідь передбачити умови та надійність оброблення з урахуванням виконання жорстких умов якості поверхонь деталей.

#### Висновки

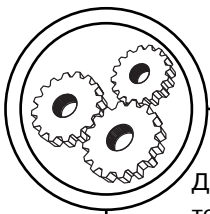
1. Теоретично досліджено утворення залишкових напружень у тонкому поверхневому шарі

оброблення поверхонь тертя підшипників ковзання з нових високолегованих та зносостійких композитних сплавів 86Х6НФТ та 4ХМНФС, синтезованих з відходів інструментальних сталей.

2. Отримані залежності залишкових напружень з урахуванням дії силового та температурного полів, що утворюються у зоні абразивного оброблення від дії поодинокого абразивного зерна у зоні зрізання стружки з поверхні оброблення.

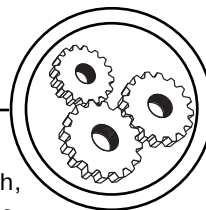
3. Досліджені залежності залишкових напружень створюють базу для всебічного експериментального визначення залишкових напружень при абразивному шліфуванні нових композитних сплавів з подальшим розробленням практичних рекомендацій для виробництва з урахуванням оптимізації вибору типу абразивного інструмента та режимів тонкого шліфування.

1. Патент України № 60522, МПК С22С33/02 (2006.01). Підшипниковий композиційний матеріал на основі інструментальної сталі / Роїк Т. А., Гавриш А. П., Киричок П. О., Гавриш О. А., Віцюк Ю. Ю., Мельник О. О. опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12. 2. Роїк Т. А. Сучасні системи технологій заготівельного виробництва в машинобудуванні / Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, О. А. Гавриш : Монографія. — К. : ЕКМО, 2010. — 212 с. 3. Гавриш О. А. Новітні технології виробництва стандартизованих виробів / О. А. Гавриш, Ю. Ю. Віцюк, Т. А. Роїк, А. П. Гавриш, С. В. Войтко : Монографія. — К. : НТУУ «КПІ». — 2012. — 204 с. 4. Гавриш А. П. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк // Технологія і техніка друкарства. — 2012. — № 3. — С. 65–77. 5. Гавриш А. П. Аналіз параметрів якості поверхонь підшипників ковзання з композиційних сплавів для друкарських машин при абразивному шліфуванні / А. П. Гавриш // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2013. — № 2. — С. 31–38. 6. Гавриш А. П. Силоне поле при тонкому абразивному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних сплавів для друкарської техніки / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк // Междунар. сб. науч. трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения». — Донецк :



ДонНТУ, 2013. — Вып. 45. — С. 41–47. 7. Гавриш А. П. Дослідження температур при тонкому абразивному шліфуванні деталей з композитів на основі відходів інструментальних сталей / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, Т. А. Роїк, Ю. Ю. Віцюк // Вісник Тернопільського технічного університету. — 2013. — № 1. — С. 21–29. 8. Гавриш А. П. Алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів / А. П. Гавриш, П. П. Мельничук : Монографія. — Житомир : ЖДТУ, 2003. — 652 с. 9. Киричок П. О. Зміцнююче-оздоблювальна обробка деталей у машинобудуванні / П. О. Киричок. — К : Видавництво «Знання». — 1990. — 36 с. 10. Проскуряков Ю. Г. Технология упрочняющее-калибрующей формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскуряков. — М. : Машиностроение. — 1981. — 208 с. 11. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин / И. А. Биргер, Б. Ф. Шор, Г. Б. Иосшевич. — М. : Машиностроение. — 1979. — 702 с. 12. Безъязычный В. Ф. Расчет температурных остаточных напряжений в поверхностном слое деталей при механической обработке / В. Ф. Безъязычный // Физика и химия обработки материалов. — 1996. — № 5. — С. 37–42. 13. Гавриш А. П. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, П. П. Мельничук. — Житомир : ЖІТІ. — 2001. — 516 с. 14. Папшев Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка сталей поверхностным пластическим деформированием / Д. Д. Папшев. — М. : Машиностроение. — 1965. — С. 29–37. 15. Тимошенко С. П. Механика материалов / С. П. Тимошенко, Дж. Герс. — М. : Мир. — 1996. — 66 с. 16. Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов / Под ред. И. К. Походни. — К. : Наукова думка. — 1990. — 224 с.

1. Patent Ukrainy № 60522, МПК S22S33/02 (2006.01). Pidshypnykovyi kompozytsiynyi material na osnovi instrumentalnoi stali / Roik T. A., Havrysh A. P., Kyrychok P. O., Havrysh O. A., Vitsiuk Iu. Iu., Melnyk O. O. opubl. 25.06.2011, Biul. № 12. 2. Roik T. A. Suchasni systemy tekhnologii zahotivel'nogo vyrobnytstva v mashynobuduvanni / T. A. Roik, A. P. Havrysh, O. A. Havrysh : Monohrafiia. — K. : EKMO, 2010. — 212 s. 3. Havrysh O. A. Novitni tekhnologii vyrobnytstva standartyzovanykh vyrobiv / O. A. Havrysh, Iu. Iu. Vitsiuk, T. A. Roik, A. P. Havrysh, S. V. Voitko : Monohrafiia. — K. : NTUU «KPI». — 2012. — 204 s. 4. Havrysh A. P. Vplyv abrazynnoho instrumentu na shorstkist poverkhon kompozytnykh pidshypnykiv polihrafichnoi tekhniki pry tonkomu shlifuvanni / A. P. Havrysh, P. O. Kyrychok, T. A. Roik, Iu. Iu. Vitsiuk // Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva. — 2012. — № 3. — S. 65–77. 5. Havrysh A. P. Analiz parametriv yakosti poverkhon pidshypnykiv kovzannia z kompozytsiynykh splaviv dlia drukarskykh mashyn pry abrazynnomu shlifuvanni / A. P. Havrysh // Naukovi visti NTUU «KPI». — 2013. — № 2. — S. 31–38. 6. Havrysh A. P. Cylove pole pry tonkomu abrazynnomu shlifuvanni detalei tertia z novykh kompozytsiynykh splaviv dlia drukarskoi tekhniki / A. P. Havrysh, P. O. Kyrychok, T. A. Roik, Iu. Iu. Vitsiuk // Mezhdunar. sb. nauch. trudov «Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroenija». — Doneck : DonNTU, 2013. — Vyp. 45. — S. 41–47. 7. Havrysh A. P. Doslidzhennia temperatur pry tonkomu abrazynnomu shlifuvanni detalei z kompozytiv na osnovi vidkhodiv instrumentalnykh stalei / A. P. Havrysh, P. O. Kyrychok, T. A. Roik, Iu. Iu. Vitsiuk // Visnyk Ternopil'skoho tekhnichnogo universytetu. — 2013. — № 1. — S. 21–29. 8. Havrysh A. P.



Almazno-abrazyvna obrobka mahnitnykh materialiv / A. P. Havrysh, P. P. Melnychuk : Monohrafiia. — Zhytomyr : ZhDTU, 2003. — 652 s.

9. Kyrychok P. O. Zmitsniuiuche-ozdobliuvalna obrobka detalei u mashynobuduvanni / P. O. Kyrychok. — K : Vydavnytstvo «Znannia». — 1990. — 36 s.

10. Proskurjakov Ju. G. Tehnologija uprochnjajushhee-kalibrujushhej formoobrazujushhej obrabotki metallov / Ju. G. Proskurjakov. — M. : Mashinostroenie. — 1981. — 208 s.

11. Birger I. A. Raschet na prochnost' detalej mashin / I. A. Birger, B. F. Shor, G. B. Ioshevich. — M. : Mashinostroenie. — 1979. — 702 s.

12. Bez#jazychnyj V. F. Raschet temperaturnyh ostatochnyh naprjazhenij v poverhnostnom sloe detalej pri mehanicheskoy obrabotke / V. F. Bez#jazychnyj // Fizika i himija obrabotki materialov. — 1996. — № 5. — S. 37–42.

13. Havrysh A. P. Pidvyshchennia nadiinosti detalei mashyn poverkhnevym plastychnym deformuvanniam / A. P. Havrysh, P. O. Kyrychok, P. P. Melnychuk. — Zhytomyr : ZhITI. — 2001. — 516 s.

14. Papshev D. D. Otdelochno-uprochnjajushhaja obrabotka stalej poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem / D. D. Papshev. — M. : Mashinostroenie. — 1965. — S. 29–37.

15. Timoshenko S. P. Mehanika materialov / S. P. Timoshenko, Dzh. Gers. — M. : Mir. — 1996. — 66 s.

16. Metallurgija dugovoj svarki. Processy v duge i plavlenie jelektrodov / Pod red. I. K. Pohodni. — K.: Naukova dumka. — 1990. — 224 s.

Рецензент — В. Ф. Морфлюк, д.т.н.,  
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 28.02.13