

УДК 621.791:519.876.5

**В.В. Аулін, проф., канд. ф-м. наук, В.М. Бобрицький, доц., канд. техн. наук**  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Комп'ютерне моделювання полів температур та напружень в композиційних матеріалах та покриттях при їх формуванні, терті та зношуванні

В статті за допомогою комп'ютерного моделювання досліджено поле температур та напружено-деформований стан композиційних матеріалів та покриттів на всіх етапах їх життєвого циклу.

Визначено розподіл нестационарних полів температур та напружень, які виникають в композиційних матеріалах та покриттях в процесі їх формування і терті та зношування, а також локальні області з максимальною різницею перепаду температур і напружень та вплив на них внутрішніх і зовнішніх факторів. Виявлено тісний взаємозв'язок між складом композиційних матеріалів і покриттів, розмірами і формою їх структурних складових та статистичними і локальними значеннями досліджуваних полів температур і напружень відповідних нестационарних полів.

Результати комп'ютерного моделювання дають можливість оптимізувати склад та структуру композиційних матеріалів та покриттів для підвищення їх фізико-механічних та триботехнічних характеристик і властивостей

**композиційний матеріал, композиційне покриття, комп'ютерне моделювання, поле напружень, поле температур, наповнювач, матриця**

**В.В. Аулін, проф., канд. ф.-м. наук, В.Н. Бобрицький, доц., канд. техн. наук**  
*Кіровоградський національний технічний університет*

**Компьютерное моделирование полей температур и напряжений в композиционных материалах и покрытиях при их формировании, трении и износе**

В статье с помощью компьютерного моделирования исследовано распределение температуры и напряженно-деформированного состояния композиционных материалов и покрытий на всех этапах их жизненного цикла.

Определено распределение нестационарных полей температур, напряжений и деформаций, возникающих в композиционных материалах и покрытиях в процессе их формирования и трения и износа, а также локальные области с максимальной разницей перепада температур и напряжений и влияние на них внутренних и внешних факторов. Выявлена тесная взаимосвязь между составом композиционных материалов и покрытий, размерами и формой структурных составляющих, статистическими и локальными значениями температур и напряжений соответствующих нестационарных полей.

По результатам компьютерного моделирования можно оптимизировать состав и структуру композиционных материалов и покрытий для повышения их физико-механических и триботехнических характеристик.

**композиционный материал, композиционное покрытие, компьютерное моделирование, поле напряжений, поле температур, наполнитель, матрица**

**Постановка проблеми.** Аналіз передачі теплової енергії через композиційні матеріали (КМ) і композиційні покриття (КП) при їх формуванні і терті та зношуванні свідчить, що внаслідок суттєвої різниці в коефіцієнтах теплопровідності і теплоємності матеріалів матриці та наповнювачів (карбіди, бориди, оксиди та інші) миттєві температури в різних точках КМ (КП) можуть значно відрізнятись [1]. Вони

обумовлюють виникнення термічних напружень, що викликають структурні та фазові перетворення, накопичення пошкоджень або руйнування КМ (КП). Разом з тим вдалий підбір співвідношення компонентів КМ (КП) може сприяти релаксації розподілених в них напружень і істотно підвищити зносостійкість та працездатність деталей та їх спряжень [2]. Дослідження в цьому напрямку є безумовно актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Комп'ютерне моделювання є ефективним методом, який дає можливість врахувати конфігурації нестационарних полів температур, напружень та деформацій, які виникають в КМ (КП) в процесі їх формування і тертя та зношування, визначити локальні області з максимальною різницею перепаду температур і напружень та вплив на них внутрішніх і зовнішніх факторів [3-5]. До зовнішніх факторів можна віднести кількість джерел, потужність їх тепловиділення та швидкість переміщення, що є наслідком формування КМ (КП) певною технологією та ковзання у триботехнічних системах (ТТС) [6-8]. Сукупність внутрішніх факторів КМ (КП) складає: структура, хімічний склад та властивості їх компонентів, геометричні розміри та форма робочої поверхні деталі, матриці та дисперсних наповнювачів [9,10].

Відмінність між коефіцієнтами теплопровідності, теплового розширення КМ (КП) і основи та протікання дифузійних процесів при цьому спричиняють зміни напружено-деформованого стану (НДС), викликають зміну структури та хімічного складу в перехідній зоні, що утворюється між основою деталі та шаром КМ (КП) і відіграє важливу роль в зносостійкості деталей, оскільки крім силових навантажень через цю зону на основу передаються різного виду потоки енергії та маси [8,11]. Аналогічна ситуація виникає в перехідній зоні між матрицею та зміцнювальними компонентами КМ (КП). Зазначене в науковій літературі і практиці використання результатів комп'ютерного моделювання та з подальшою оптимізацією КМ (КП) і розробкою на цій основі технологій зміцнення деталей недостатньо досліджено.

**Постановка завдання.** На основі комп'ютерного моделювання з'ясувати вплив на поле температур і напружень характеристик і властивостей КМ (КП). в різних підшарах і перехідній зоні.

**Виклад основного матеріалу.** В процесі комп'ютерного дослідження властивостей стану КМ (КП) на поверхні деталей і робочих органів сільськогосподарської техніки, при їх формуванні і терті та зношуванні вважали, що їх основа має по усьому об'єму однорідні властивості. Припускається умовний поділ КМ (КП) на  $n$  підшарів і однорідність властивостей в кожному з них (рис.1).

Розрахунок контактної температури поверхневого шару проведено за допомогою диференціальних рівнянь Фур'є [10,11] для кожного виділеного підшару. При цьому припускали локальну постійність температурного поля в них як у часі, так і в просторі та зроблено наступні припущення: форма наповнювачів та їх розміри усереднені; склад та властивості матриці КМ (КП) постійні у всьому об'ємі; зовнішнє середовище не змінює КМ (КП); шар КМ (КП) по товщині розбивається на  $n$  підшарів з заданою товщиною  $h_{км(кп)i} \geq d_{n \max}$  та концентрацією наповнювачів; перехідна зона також представлена у вигляді декількох підшарів з властивостями, що змінюються від КМ (КП) до матеріалу основи деталі за певним законом; локальна концентрація наповнювачів в шарі КМ (КП) змінюється випадково; теплотехнічні властивості матеріалу основи деталі постійні для довільної точки; джерелом теплової енергії в зоні тертя є точки контакту між спряженими поверхнями деталей.

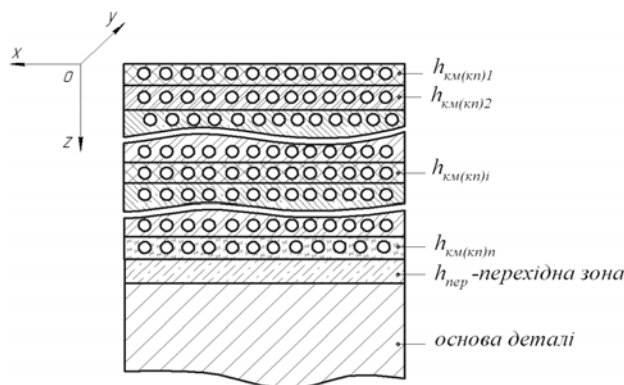


Рисунок 1 – Модель шару КМ (КП), нанесеного на поверхню деталі з сукупністю підшарів і перехідної зони

Оскільки при функціонуванні КМ (КП) в процесі експлуатації спостерігаються пластичні деформації, то перехідний шар сприймає термічні напруження, які виникають між основою матеріалу та КМ (КП). Від оптимального підбору вмісту наповнювачів в кожному підшарі та оптимальної товщини шару КМ (КП) залежить їх працездатність.

Побудову нестационарних полів температур та напружень проводили використовуючи метод скінчених елементів за допомогою пакету COSMOSWorks інтегрованого САD-систему SolidWorks, який дозволяє врахувати умови формування та експлуатації КМ (КП) з урахуванням сукупності суттєвих факторів, що впливають на процеси в КМ (КП) в таких умовах [12-14].

Щоб одержати розв'язок задачі необхідно задовольнити дві умови: умову сумісності переміщень і умову рівноваги. Перша з них задовольняється автоматично для вузлових точок, оскільки до і після підводу теплової енергії вони з'єднують одні і ті ж елементи, а для виконання умов сумісності на межах елемента спеціальним чином підбирається вид функції форми усередині елемента.

Нехай температура  $T$  довільного елемента  $x_{i,j,k}$ , вирізаного з просторової області КМ (КП) у будь-якому напрямку відображається зміною відповідної координати. Температура кожної точки просторового елемента КМ (КП) задається використавши припущення, що точки зв'язані між собою температурними стрижнями і описується рівнянням Фур'є:

$$\frac{\partial}{\partial t} T(z, t) = a_{\text{км(кп)}} \frac{\partial^2}{\partial z^2} T(z, t), \quad (1)$$

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

$t$  – поточний час процесу;

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

При переході від безперервних змінних до дискретних величин отримуємо різницеві рівняння, які описують зміну температури точки в залежності від параметрів температурного поля в підшарах:

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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \approx \frac{1}{h_{\text{км(кп)}}} \left[ \left( \frac{\Delta T}{h_{\text{км(кп)}}} \right)_+ - \left( \frac{\Delta T}{h_{\text{км(кп)}}} \right)_- \right] = \frac{T_{i+1,k} + T_{i-1,k} - 2T_{i,k}}{h_{\text{км(кп)}i}^2}. \quad (3)$$

Після проведення перетворень отримуємо рівняння, яке характеризує зміну температури точки під час проходження теплового потоку в  $i$ -тому підшарі КМ (КП):

$$\frac{\partial}{\partial t} T(z, t) \approx \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t_i}. \quad (4)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (1) і (4) з урахуванням (3), залежність зміни температури точки від коефіцієнта, що враховує теплоінерційність, дорівнює:

$$\frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta t_i} = \frac{a_{\text{КМ(КП)}} (T_{i+1,k} - T_{i-1,k})}{h_{\text{КМ(КП)}i}^2} - \frac{2a_{\text{КМ(КП)}} T_{i,k}}{h_{\text{КМ(КП)}i}^2}; \quad (5)$$

$$a_{\text{КМ(КП)}} = \frac{\lambda_{\text{КМ(КП)}}}{c_{\text{КМ(КП)}} \rho_{\text{КМ(КП)}}}, \quad (6)$$

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

Для одновимірної теплової задачі маємо:

$$T_{i,k+1} = \frac{a_{\text{КМ(КП)}} \Delta t_i}{h_{\text{КМ(КП)}i}^2} (T_{i+1,k} + T_{i-1,k}) - \frac{2a_{\text{КМ(КП)}} \Delta t_i}{h_{\text{КМ(КП)}i}^2} T_{i,k} + T_{i,k}. \quad (7)$$

Якщо прийняти позначення:

$$F_{oz} = \frac{a_{\text{КМ(КП)}} \Delta t_i}{h_{\text{КМ(КП)}i}^2} \quad (8)$$

то (7) набуває вигляду:

$$T_{i,k+1} = F_{oz} (T_{i+1,k} + T_{i-1,k}) + (1 - 2F_{oz}) T_{i,k}, \quad (9)$$

тобто рівняння має сенс за умови:  $F_{oz} \leq 0,5$ .

Якщо  $F_{oz} \geq 0,5$ , то

$$T_{i,k+1} = 0,5(T_{i+1,k} + T_{i-1,k}). \quad (10)$$

Дану теплову задачу можна розглядати і у тривимірному випадку, при цьому слід перейти до її просторового розгляду, тобто маємо наступну умову рівноваги:  $(F_{ox} + F_{oy} + F_{oz}) \leq 0,5$ .

Оскільки досліджувана просторова область КМ (КП) має  $N$  елементарних локальних областей, то математична модель тривимірного КМ (КП) буде складатися з  $N$  виразів типу (9) та (10). Послідовно досліджуючи на ПК кожен локальний область можна отримати отримуємо загальну картину температурного розподілу в КМ (КП), перехідній зоні та верхньому шарі основи матеріалу деталі (рис.2).

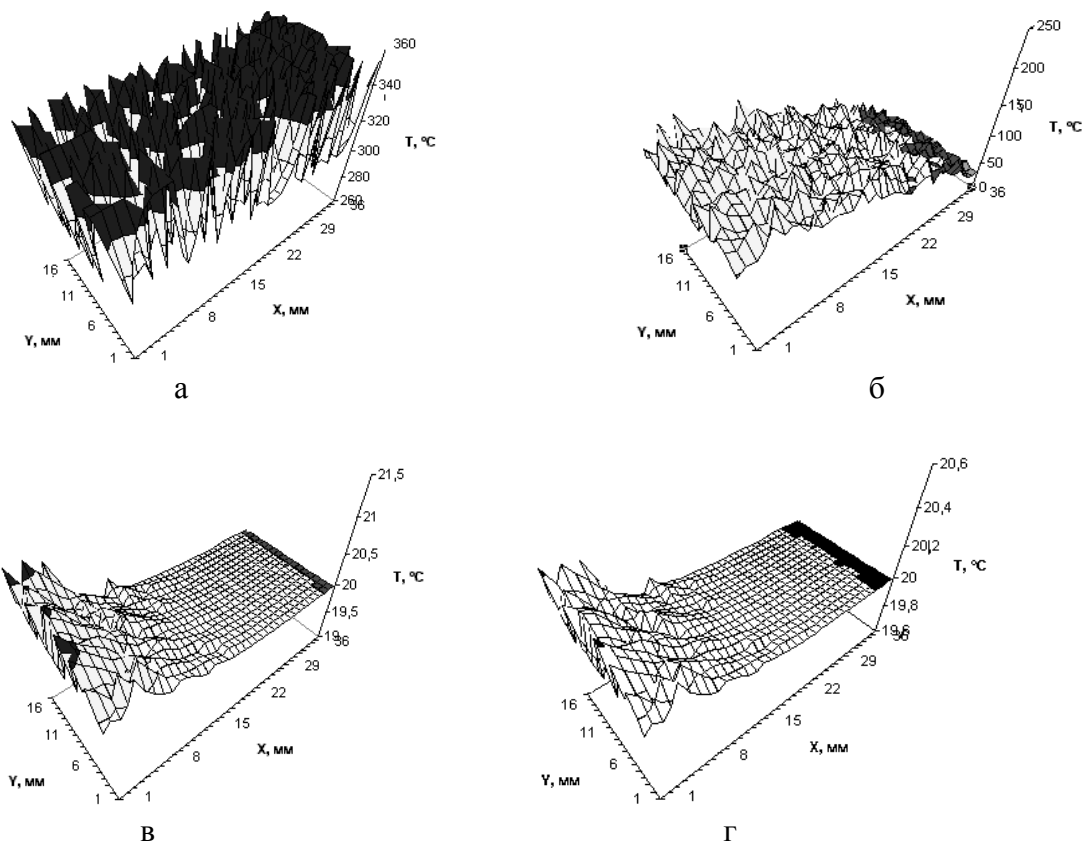
НДС в елементарному об'ємі КМ (КП) обумовлений неоднорідністю теплового розширення матриці та наповнювачів і визначається системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{xi} = \frac{1}{E_{\text{КМ(КП)}}} [\sigma_{xi} - \mu_{\text{КМ(КП)}} (\sigma_{yi} + \sigma_{zi})]; \quad \gamma_{xyi} = \frac{\tau_{xyi}}{G_{\text{КМ(КП)}}}; \\ \varepsilon_{yi} = \frac{1}{E_{\text{КМ(КП)}}} [\sigma_{yi} - \mu_{\text{КМ(КП)}} (\sigma_{zi} + \sigma_{xi})]; \quad \gamma_{yzi} = \frac{\tau_{yzi}}{G_{\text{КМ(КП)}}}; \\ \varepsilon_{zi} = \frac{1}{E_{\text{КМ(КП)}}} [\sigma_{zi} - \mu_{\text{КМ(КП)}} (\sigma_{xi} + \sigma_{yi})]; \quad \gamma_{zxi} = \frac{\tau_{zxi}}{G_{\text{КМ(КП)}}}, \end{array} \right. \quad (11)$$

де  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  – нормальні напруження в напрямках X, Y, Z;

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  – дотичні напруження в площинах XY, YZ, ZX;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  – відносні деформації в напрямках X, Y, Z;  
 $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$  – відносний зсув в площадках XY, YZ, ZX;  
 $E_{\text{KM(КП)}}, G_{\text{KM(КП)}}, \mu_{\text{KM(КП)}}$  – модулі пружності, зсуву та коефіцієнт Пуассона матеріалу KM (КП),  $G_{\text{KM(КП)}} = 0,5 \cdot E_{\text{KM(КП)}} / (1 - \mu_{\text{KM(КП)}})$ .



а - верхній шар KM (КП), б - верхній шар перехідної зони, в - нижній шар перехідної зони, г - верхній шар основи матеріалу деталі

Рисунок 2 –Приклад діаграми розподілу температурних полів в деталі, зміцненій KM (КП)

З урахуванням об'ємного вмісту наповнювача, маємо:

$$\begin{aligned} E_{\text{KM(КП)}} &= E_M(1 - c_H) + E_H c_H; \quad G_{\text{KM(КП)}} = G_M(1 - c_H) + G_H c_H; \\ \mu_{\text{KM(КП)}} &= \mu_M(1 - c_H) + \mu_H c_H; \quad \alpha_{\text{KM(КП)}} = \alpha_M(1 - c_H) + \alpha_H c_H, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $E_M, G_M, \alpha_M, \mu_M$ ;  $E_H, G_H, \alpha_H, \mu_H$  – модулі пружності та зсуву, коефіцієнти лінійного теплового розширення та Пуассона матеріалу матриці та наповнювача.

Враховуючи різницю температури у двох сусідніх елементарних об'ємах KM (КП) в системі рівнянь (11) отримаємо систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha_{\text{KM(КП)}} \Delta T_{xi} &= \frac{1}{E_{\text{KM(КП)}}} [\sigma_{xi} - \mu_{\text{KM(КП)}} (\sigma_{yi} + \sigma_{zi})]; \quad \alpha_{\text{KM(КП)}} (\Delta T_{xi} - \Delta T_{yi}) = \frac{\tau_{xyi}}{G_{\text{KM(КП)}}} \\ \alpha_{\text{KM(КП)}} \Delta T_{yi} &= \frac{1}{E_{\text{KM(КП)}}} [\sigma_{yi} - \mu_{\text{KM(КП)}} (\sigma_{zi} + \sigma_{xi})]; \quad \alpha_{\text{KM(КП)}} (\Delta T_{yi} - \Delta T_{zi}) = \frac{\tau_{yzi}}{G_{\text{KM(КП)}}} \\ \alpha_{\text{KM(КП)}} \Delta T_{zi} &= \frac{1}{E_{\text{KM(КП)}}} [\sigma_{zi} - \mu_{\text{KM(КП)}} (\sigma_{xi} + \sigma_{yi})]; \quad \alpha_{\text{KM(КП)}} (\Delta T_{zi} - \Delta T_{xi}) = \frac{\tau_{zxi}}{G_{\text{KM(КП)}}}. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (13) відносно складових нормальних і дотичних напружень, для елементарного об'єму КМ (КП) маємо:

- систему нормальних напружень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xi} = E_{\text{КМ(КП)}} \alpha_{\text{КМ(КП)}} \frac{(1 - \mu_{\text{КМ(КП)}}) \Delta T_{xi} + \mu_{\text{КМ(КП)}} (\Delta T_{yi} + \Delta T_{zi})}{1 - \mu_{\text{КМ(КП)}} - 2\mu_{\text{КМ(КП)}}^2}; \\ \sigma_{yi} = E_{\text{КМ(КП)}} \alpha_{\text{КМ(КП)}} \frac{(1 - \mu_{\text{КМ(КП)}}) \Delta T_{yi} + \mu_{\text{КМ(КП)}} (\Delta T_{zi} + \Delta T_{xi})}{1 - \mu_{\text{КМ(КП)}} - 2\mu_{\text{КМ(КП)}}^2}; \\ \sigma_{zi} = E_{\text{КМ(КП)}} \alpha_{\text{КМ(КП)}} \frac{(1 - \mu_{\text{КМ(КП)}}) \Delta T_{zi} + \mu_{\text{КМ(КП)}} (\Delta T_{xi} + \Delta T_{yi})}{1 - \mu_{\text{КМ(КП)}} - 2\mu_{\text{КМ(КП)}}^2}, \end{array} \right. \quad (14)$$

- систему дотичних напружень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{xyi} = G_{\text{КМ(КП)}} \alpha_{\text{КМ(КП)}} (\Delta T_{xi} - \Delta T_{yi}); \\ \tau_{yzi} = G_{\text{КМ(КП)}} \alpha_{\text{КМ(КП)}} (\Delta T_{yi} - \Delta T_{zi}); \\ \tau_{zxi} = G_{\text{КМ(КП)}} \alpha_{\text{КМ(КП)}} (\Delta T_{zi} - \Delta T_{xi}). \end{array} \right. \quad (15)$$

При цьому сумарне напруження в елементарному об'ємі КМ (КП) дорівнює:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{xi} - \sigma_{yi})^2 + (\sigma_{yi} - \sigma_{zi})^2 + (\sigma_{zi} - \sigma_{xi})^2 + 6(\tau_{xyi}^2 + \tau_{yzi}^2 + \tau_{zxi}^2)}, \quad (16)$$

а в шарі КМ (КП) -  $\sigma_{iu} = \sum_{i=1}^n \sigma_i$ .

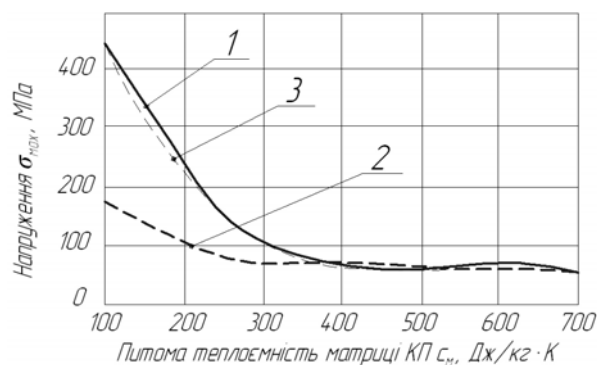
При дослідженні НДС КМ (КП) серію комп'ютерних досліджень проведено із визначенням впливу розмірів, концентрації та фізико-механічних властивостей наповнювачів та питомої теплоємності матриці на величину термонапружень в умовах нестационарних процесів формування і тертя та зношування КМ (КП). В процесі тертя та зношування для досліджуваних КП вважали, що коефіцієнт тертя  $f_{\text{тр}}=0,25$ ; нормальна сила на трибологічний контакт  $N=(100...500)$  Н; швидкість ковзання  $v=0,01...2$  м/с; початкова температура  $T_0=20^\circ\text{C}$ ; напруження текучості матриці  $\sigma_{\text{т}}=990$  МПа; розміри наповнювачів  $d_{\text{н}}=\{0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07, 0,08, 0,09, 0,10\}$  мм; матеріал наповнювачів -  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  $\text{SiC}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{W}_2\text{C}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{CrB}_2$ ,  $\text{MoB}$ ; матеріал матриці – тверді розчини на основі Fe.

Попередні дослідження показали, що на суттєву неоднорідність миттєвих полів температури та полів напружень впливають фактори: параметри структури та фізико-механічні властивості її компонентів (теплоємність, теплоінерційність, коефіцієнти теплопередачі, розміри і концентрація наповнювачів, модулі пружності складових та ін.), технологічні параметри та параметри процесів тертя. Особливо великі перепади поля температур та напружень виникають під час запуску ТТС та перехідних теплових процесів в зоні тертя.

Характерна залежність пікових напружень у КМ (КП) з наповнювачем карбіду хрому  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  від теплоємності матриці із металевих сплавів наведена на рис 3. Можна бачити, що зі збільшенням теплоємності матриці пікові напруження у КМ (КП) істотно знижуються.

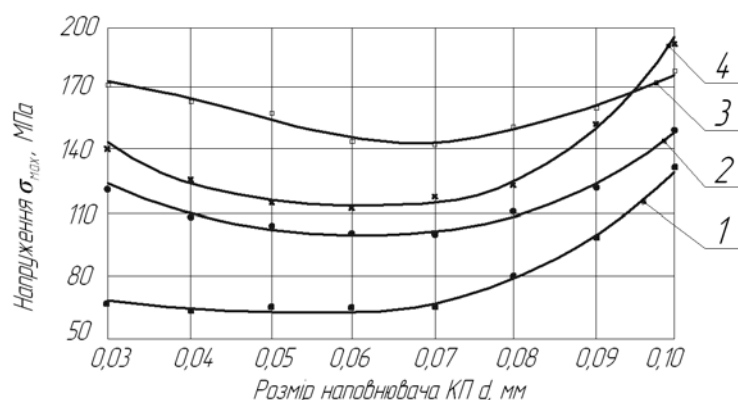
Результати показали, що з точки зору мінімізації максимальних термічних напружень КМ (КП) необхідно вибирати склад матриці таким чином, щоб її теплоємність була достатньо висока та близька до теплоємності наповнювача.

Вплив розмірів наповнювача в КП на пікові термічні напруження наведено на рис.4.



1 – напруження у покритті, 2 – напруження у перехідній зоні, 3 – теоретична крива залежності

Рисунок 3 – Вплив теплоємності матриці на величину максимальних термічних напружень розтягу в композиційних покриттях з дисперсним типом структури (карбіди  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ):



1 – покриття з дисперсним карбідом  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , 2 – покриття з евтектичним типом структури  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ,  
3 – покриття з дисперсним карбідом  $\text{TiC}$ , 4 – покриття з евтектичним типом структури  $\text{TiC}$

Рисунок 4 – Залежність величини пікових термічних напружень в КП від розмірів наповнювача

Результати досліджень свідчать, що величина і характер кривих залежності напруження в КМ (КП) від розмірів наповнювача передусім визначається типом КМ (КП) і відповідно типом наповнювача. Величина напруження  $\sigma_{\max}$  в дисперсних КП зі збільшенням розміру наповнювача збільшується. Характер цього збільшення залежить від типу карбіду. Незважаючи на невеликі локальні мінімуми відслідковується стійка тенденція до підвищення пікових термічних напружень у межах розглянутого діапазону при зростанні розмірів карбідних наповнювачів. Це дозволяє рекомендувати використання карбідних наповнювачів з високою дисперсністю для КМ (КП) з такою структурою та службовим призначенням.

Для КМ (КП) з евтектичним типом структури характерним є наявність мінімуму на кривій залежності величини термічних напружень від розмірів наповнювачів. Ці області можна рекомендувати в якості оптимальних для даного типу КП.

Не змінюється характер виявленого впливу розмірів наповнювачів на пікові термічні напруження і при застосуванні для зміцнення боридів. У цьому випадку для структури евтектичного типу також є мінімум на кривих залежності пікових термічних напружень від розмірів наповнювачів (при розмірах наповнювачів біля 0,06 мм), а для структур з дисперсним зміцненням збільшення розмірів наповнювачів викликає ріст пікових термічних напружень.

Виявлені функціональні залежності пікових термічних напружень від структури та розмірів складових КМ (КП) є наслідком не тільки властивостей самого КМ (КП), але й властивостей спряжень в ТТС від енергомасопереносу в ній.

Вплив навантаження в трибоконтакті на величину пікових навантажень стиску КП показано на рис.5.

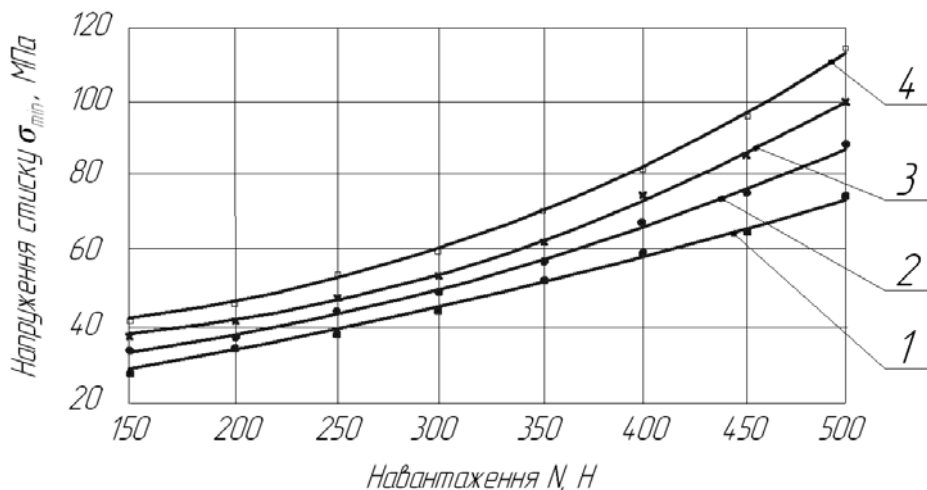
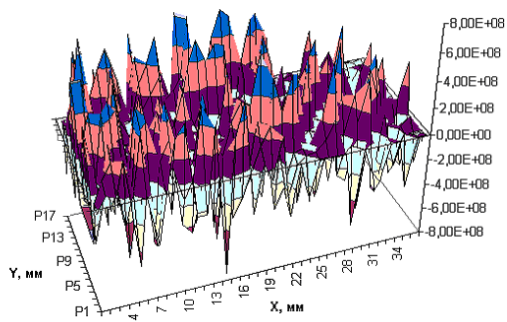


Рисунок 5 – Залежність величини пікових термічних напружень в КП з дисперсним типом структур від навантажень і розмірів наповнювача  $Si_3C_2$ :  
1 – 0,03 мм, 2 – 0,05 мм, 3 – 0,08 мм, 4 – 0,10 мм.

Можна бачити, що залежність має експоненціально зростаючий характер зі збільшенням навантаження.

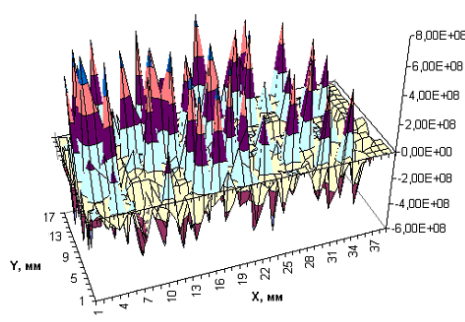
Для КМ (КП), сформованих на основі використання сумішей різних наповнювачів (карбідів і боридів), проведено розрахунок екстремальних значень напружень розтягу та стиску під впливом температурних деформацій матеріалу.

В результаті розрахунків були отримані конфігурації полів напружень у КМ (КП), зміцнених наповнювачами з різних матеріалів - рис. 6.



а

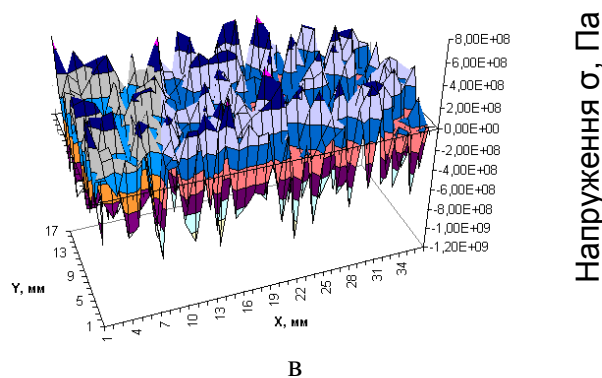
Напруження  $\sigma$ , Па



б

Напруження  $\sigma$ , Па





а - в шарі КП з карбідами  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ; б - в перехідній зоні КП з карбідами  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ , в - в шарі КП з борідами  $\text{CrB}$  (розмір наповнювача 0,05 мм,  $v=1$  м/с)

Рисунок 6 – Розподіл термонапружень у координатах площини X-Y

На наведених діаграмах вибраного шару покриття подано величину напруження для кожної локальної області. Додатний знак напруження відповідає деформації розтягу, а від'ємний - деформаціям стиску. Спостерігаються нестационарні теплові поля та поля напружень, викликані у КМ (КП) процесами тертя, є суттєво неоднорідними по усіх координатах матеріалу. Конфігурацію цих полів обумовлюють гетерогенність структури, теплофізичні властивості компонентів КМ (КП) та динаміка процесу тертя. Установлено, що параметри структури та її склад мають значний вплив на статистичні характеристики досліджуваних полів.

**Висновки.** 1. Проведене комп'ютерне моделювання КМ (КП) дало можливість побудувати нестационарні теплові поля і поля термічних напружень в КМ (КП) з дисперсно-зміцненими та евтектичними типами структур, що виникають від нестационарних джерел тепла (процесів тертя).

2. Показано, що конфігурація цих полів суттєво неоднорідна, мають місце значні перепади температур та напружень, зумовлені гетерогенністю структури, неоднорідністю теплофізичних та механічних властивостей структурних складових КМ (КП), які досягають, в залежності від навантаження в процесі тертя, температур плавлення компонентів, а локальні напруження – до кількох ГПа. При цьому величини напружень розтягу та стиску чергуються по усьому об'єму КМ (КП).

3. Існує тісний взаємозв'язок між складом КМ (КП), розмірами і формою структурних складових та статистичними і локальними значеннями температур і напружень відповідних нестационарних полів. Для зменшення перепадів температур та термічних напружень слід використовувати однорідні за розмірами структури наповнювача з максимальною дисперсністю карбідів та вирівнювати теплофізичні властивості наповнювачів і матриці, що повинно забезпечити високу релаксаційну здатність.

4. В процесі припрацювання спряжень деталей метастабільність їх матеріалів, досягнута при формуванні КМ (КП), порушується внаслідок виникнення неоднорідних полів температур та напружень. У поверхневих шарах генерується значна кількість дислокацій, відбувається створення відповідних субструктур та спостерігається самоорганізація структури поверхневого шару, що в значній впливає на механізм припрацювання.

5. Виявлено, що найбільш навантаженими у КМ (КП) є перехідні зони: між поверхневими шарами та основою деталі; між наповнювачем та матрицею; між поверхнями матеріалів ТЕ та середовищем в ТТС.

## Список літератури

1. Белоусов В.Я. Долговечность деталей машин с композиционными материалами / В.Я. Белоусов. – Львів: Вища школа, 1984. – 180 с.
2. Аулін В.В. Зносостійкість гетерогенних КМ і КП в умовах абразивного зношування / В.В.Аулін // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Вип. 40. – мелітополь, ТДАТА, 2006. – С.5-11
3. Алямовский А.А. SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов /А.А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
4. Ковальский А.В. Напряженное состояние и изнашивание композиционных материалов при трении: Дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.04 "Трение и износ в машинах", спец. 05.16.06 "Порошковая металлургия и композиционные материалы" / А.В. Ковальский. – Киев, 1987. – 189с.
5. Кузьменко А.Г. Напряжение в контакте: монография / А. Г. Кузьменко. – Хмельницкий: ХНУ, 2008. – 349 с. – (Теоретическая и экспериментальная трибология: в 12 т.; т. 4).
6. Аулін В.В. Напружено-деформований стан поверхневих шарів гомогенних і гетерогенних матеріалів при терті і зношуванні / В.В. Аулін/ Сучасні проблеми триботехніки / Матеріали міжн. наук. техн. конф. 27-29 вересня. – Миколаїв: НУК, 2007. – С. 83-86.
7. Аулін В.В. Проблема створення композиційних матеріалів та композиційних покриттів триботехнічного призначення / В.В. Аулін, М.І. Черновол // Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 4-й междунар. научн.-техн. конф., 24-26 мая 2005, г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2005. – С. 291-294.
8. Черновол М.И. Упрочнение деталей машин композиционными покрытиями / М.И. Черновол, В.В. Аулин // AFES2005 Proceeding. The sixth international scientific forum aims for future of engineering science. – march 23-30. – 2005. – Hong-Kong. – P. 86-91.
9. Аулін В.В. Фізичні основи тертя і спрацювання композиційних матеріалів та покриттів/В.В.Аулін// Восьмий міжнар. симпозиум українських інженерів-механіків у Львові: Тези доповідей. – Львів: КІНПАТРИ ЛДТ. – 2007. – С. 134.
10. Аулін В.В. Визначення об'ємного вмісту наповнювача в антифрикційному композиційному покритті / В.В. Аулін // Машинознавство, 2004. – №7(85). – С. 49-53.
11. Аулін В.В. Теоретичні основи створення керованих композиційних матеріалів і покриттів триботехнічного призначення/ В.В. Аулін, М.І. Черновол// Инженерия поверхности и реновация изделий. Материалы 6-й междунар. научн.-техн. конф., 30 мая – 1 июня 2006, г. Ялта. – Киев: АТМ Украины, 2006. – С.23-25.
12. Аулін В.В. Поле напружень в композиційному матеріалі та композиційному покритті в умовах тертя ковзання /В.В. Аулін// Зб. наук. праць Луганського нац. аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: ЛНАУ, 2006, - №.65(88) – С.13-20.
13. Бардзокас Д.И. Математическое моделирование физических процессов в композиционных материалах периодической структуры / Д.И. Бардзокас, А.И. Зобнин. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 376 с.
14. Аулін В.В. Фазові перетворення в композиційних матеріалах триботехнічного призначення із структурою шпінелі/ В.В. Аулін, М.А. Зіновік, В.О. Дубовик, І.Б. Назар// Зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. університету "Техніка в с.г. виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація". – Кіровоград: КНТУ, 2007. – Вип. 18 С.151-157.

**Viktor Aulin, Vitalii Bobrytskyi**

*Kirovograd national technical university*

**Computer modeling of temperature and stress-deformation state in composite materials and coatings at their formation and friction and wear**

The article by computer simulation investigated the distribution of temperature and stress-strain state of composite materials and coatings at all stages of their life cycle. Determined the distribution of transient temperature fields, stresses and strains that occur in composite materials and coatings in the process of forming and friction and wear, as well as local areas with a maximum difference of temperature and stress and the impact on their internal and external factors.

Computer simulation of composite materials and composite coatings made it possible to construct a non-stationary heat field and thermal stress field in composite materials and composite coatings with dispersion - strengthened and eutectic types of structures that arise from stationary sources of heat ( of friction ). It is shown that the configuration of these fields are essentially uniform, there are significant changes in temperature and stress due to heterogeneity of structure heterogeneity thermophysical and mechanical properties of the structural components of composite materials and composite coatings that achieve , depending on the load of friction , melting components, and local stress - up to several GPa. The value of tensile stress and compressive alternating throughout the volume of the composite material and composite coatings. There is a close relationship between the structure of composite materials and composite coatings, the size and shape of structural components and statistical and local values of temperature and stress appropriate nonstationary fields.

To minimize temperature changes and thermal stresses to use uniform size structure of the filler with a maximum dispersion of carbides and align the thermal properties of filler and matrix, which must provide high relaxation ability. According to the results of computer simulation can optimize the composition and structure of composite materials and coatings to enhance their physical and mechanical characteristics and tribotechnical.

**composite material, a composite coating, computer modeling, the stress field, the temperature field, the filler matrix**

Одержано 14.05.14

**УДК 004.82, 621.396**

**А.С. Коваленко, О.А. Смірнов, проф., д-р техн. наук, О.В. Коваленко, доц., канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## **Структура системи технічної діагностики інтегрованих інформаційних систем**

Розглянуто структуру системи технічної діагностики інтегрованої інформаційної системи. Виділені основні режими контролю її елементів. Визначені складові та функції елементів динамічної експертної системи, що пропонується.

**інтегрована інформаційна система, структура системи технічної діагностики**

**А.С. Коваленко, А.А. Смирнов, проф., д-р техн. наук, А.В. Коваленко, доц., канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет*

**Структура системы технической диагностики интегрированных информационных систем**

Рассмотрена структура системы технической диагностики интегрированной информационной системы. Выделены режимы контроля ее элементов. Определены составляющие и функции элементов динамической экспертной системы, предлагается.

**интегрированная информационная система, структура системы технической диагностики**

**Постановка проблеми.** Аналіз тенденцій розвитку інтегрованих високотехнологічних засобів і систем, що застосовуються в процесі управління всіма видами рухомих об'єктів, як у цивільній, так і у військовій сфері. Постанови Кабінету Міністрів України [1] показують необхідність підтримки інтегрованої інформаційної системи (далі ІС) методом створення підсистеми технічної діагностики.