

Т. М. МЕЩЕРЯКОВА (Львівська філія ДПТУ), М. О. КУЗІН (Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАНУ, Львів)

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МІКРОСТРУКТУРИ ПІДШИПНИКОВИХ СПЛАВІВ У ЗОНІ ТЕРТЬОВОГО КОНТАКТУ

Показана можливість використання імітаційних моделей структури і варіаційних моделей механіки для визначення кількості і розмірів фаз в антифрикційних сплавах з підвищеною зносостійкістю. Реалізація моделей на рівні числових оцінок дозволила встановити, що оптимальними параметрами мікроструктури бабіту Б16, при яких підвищується його зносостійкість, є наявність в сплаві 56 % зміцнюючої фази SnSb, розмір якої складає 47 мкм.

Показана возможность использования имитационных моделей структуры и вариационных моделей механики для определения количества и размеров фаз в антифрикционных сплавах с повышенным сопротивлением изнашиванию. Реализация моделей на уровне числовых оценок позволила установить, что оптимальными параметрами микроструктуры баббита Б16, при которых повышается его износостойкость, является присутствие в сплаве 56 % упрочняющей фазы SnSb, размер которой 47 мкм.

The possibility of using the simulation structure models and variation models of mechanics is shown for finding quantity and size of antifriction alloy phase with raised wear resistance. The numerical realization of models displays that the optimal value of structure parameters of babbit B16 is 56 % of hardening phase SnSb with average size of 47 mkm.

Вступ

В тягових двигунах електровозів, що працюють на залізницях України, використовують бабітові вкладиші підшипників ковзання. Їх виготовлення і ремонт проводять методом відцентрового лиття.

Відцентрові сили впливають на формування структури, оскільки до складу бабіту входять фази з різними фізико-хімічними властивостями. Зокрема, тверді включення SnSb мають питому вагу $6,3 \text{ г/см}^3$, $\text{Cu}_3\text{Sn} - 7,86 \text{ г/см}^3$, а Pb – $11,34 \text{ г/см}^3$.

Довговічність і надійність роботи підшипників в умовах дії інтенсивних зовнішніх навантажень визначаються внутрішньою структурою матеріалу в зоні контакту та умовами експлуатації. У випадку, коли умови експлуатації задані, єдиним фактором, що визначає довговічність деталі, є її внутрішня будова.

Дана робота присвячена питанням побудови математичних моделей механіки, що дозволяють визначати оптимальну структуру металічних систем за критерієм зносостійкості при заданих режимах експлуатації.

Формування поверхневих неоднорідних структур вимагає розвитку наукових підходів та методик розрахунку параметрів структури матеріалів контактуючих систем за критерієм зносостійкості [2, 4, 5, 14, 19, 20]. У зв'язку з цим математичне моделювання поведінки структурно неоднорідних металічних систем в

умовах фрикційного навантаження та побудова алгоритмів аналітико-числового дослідження процесів їх зношування з урахуванням впливу параметрів мікроструктури відноситься до актуальних завдань [9].

Аналіз сучасних моделей механіки показує, що при інженерних розрахунках металічних тіл, які знаходяться в умовах третьового контактного навантаження, матеріал цих тіл розглядається як однорідний та ізотропний.

Але більшість антифрикційних сплавів представляють собою неоднорідні матеріали, в яких структурні складові мають розміри, співрозмірні з розмірами плям контакту. Питання впливу параметрів структури таких сплавів на їх поведінку в умовах фрикційного навантаження та зношування через складність не знайшло широкого відображення в наукових дослідженнях.

Фізико-механічні властивості складових, а також їх стереометричні характеристики є відомими, але можуть суттєво відрізнятись. В зв'язку із цим підходить, що розвинуті для опису процесів в гомогенних металічних системах, а також розв'язки відповідних крайових задач не можуть бути безпосередньо використані для гетерогенних матеріалів. Тому розробка підходів та методів побудови математичних моделей механіки при аналізі процесів тертя і зношування повинні базуватись на сучасних моделях гетерогенних тіл.

Сплави, в структурі яких присутні тверда і м'яка складові, мають ряд переваг, особливо в умовах контактної взаємодії і зношування. Дискретні елементи твердої складової забезпечують такі властивості матеріалу, як міцність, жорсткість, зносостійкість; м'яка складова надає йому пластичність і в'язкість, а також забезпечує передачу і перерозподіл зовнішніх напружень на тверді елементи структури матеріалу. Очевидно, що при розв'язанні задач про фрикційне навантаження і зношування таких матеріалів не можна використовувати тільки ті характеристики, якими оцінюють об'ємні механічні властивості металічних систем. Необхідно враховувати специфічні характеристики окремих фаз і структурних складових приповерхневих шарів, які руйнуються в умовах тертя і мають середній розмір 0,1...3 мкм. Така масштабна границя пов'язана із максимально можливою довжиною пробігу дислокацій.

Для чисельного моделювання структури гетерогенного середовища використали моделі, що розглядають його на трьох рівнях ієрархії. Мікрорівень – відповідає об'єму фази, який описується підходами механіки суцільного середовища. Мезорівень – включає в себе структурні складові, в яких формуються локальні властивості структурно-неоднорідного матеріалу, що складається із однієї або декількох фаз. На макрорівні гетерогенне середовище розглядається як однорідний матеріал, ефективні властивості якого є постійними по просторових координатах.

При визначенні параметрів структури сплавів з підвищеною зносостійкістю вирішуються дві задачі: 1) визначення вмісту структурних складових; 2) розрахунок їх розмірних величин.

Узагальнену схему розв'язку задачі визначення оптимального вмісту структурних складових можна подати у вигляді алгоритму:

- 1) побудова комп'ютерної моделі структури для різного вмісту складових;
- 2) визначення ефективних механічних властивостей отриманих структур;
- 3) аналітичний опис отриманих результатів;
- 4) оптимізація отриманих залежностей за вмістом складових.

Для дослідження властивостей гетерогенних матеріалів будували геометричні моделі, які представляють собою комп'ютерні еквіваленти структури, що отримуються при дослідженні шліфів зразків сплавів. При цьому структурні складові і окремі фази моделюються геометричними фігурами. Модель структури представляє собою фігуру певного об'єму, що заповнена геометричними елементами із заданими пара-

метрами, які представляють структурні складові, або фази матеріалу [13].

Визначення макрохарактеристик модельних структур проводили з використанням теорії ефективних властивостей. Згідно цієї теорії, якщо реакція структурно-неоднорідного матеріалу на зовнішнє навантаження еквівалентна реакції деякого однорідного матеріалу, який знаходиться в аналогічних умовах навантаження, то властивості такого матеріалу можуть бути прийняті в якості ефективних властивостей структурно неоднорідного матеріалу [18].

Для визначення механічних властивостей фрагментів модельних структур було розроблено програмне забезпечення, яке дозволило за допомогою методу скінчених елементів та теорії ефективних властивостей визначити пружні характеристики отриманих структур. Використання отриманих залежностей модуля пружності і коефіцієнта Пуассона від відсоткового вмісту складових у формулах молекулярно-механічної теорії тертя [12] дає можливість проводити оптимізацію структури за фазовим складом [13].

Для визначення оптимальних розмірних параметрів структурних складових в роботі був запропонований варіант побудови варіаційної моделі механіки поведінки твердих гетерогенних тіл в умовах фрикційних навантажень з використанням підходів, представлених в роботах [3, 6, 7, 21], яка дозволяє враховувати особливості будови матеріалу на мезорівні.

Варіаційна модель механіки поведінки гетерогенних металічних тіл в умовах фрикційних навантажень

Внутрішня будова матеріалів багатьох деталей сучасних машинобудівних конструкцій представляє собою гетерогенне середовище, що містить декілька компонентів, які мають різні механічні властивості. Ці компоненти зберігають свою індивідуальність, між ними існують чіткі границі розділу. За основні параметри, які визначають внутрішню просторову будову бінарних гетерогенних металічних систем, використовуючи сучасні підходи стереології, прийmemo: 1) процентне співвідношення компонентів (φ_1, φ_2); 2) їх розмірні величини (d_1, d_2); 3) форма будови складових (z_1, z_2). Величини $\varphi_1, \varphi_2, d_1, d_2, z_1, z_2$ в загальному випадку є функціональними залежностями, які можуть задаватись аналітично або у вигляді стохастичних функцій і належать до своєї множини допустимих значень для заданої металічної системи: $\varphi_1, \varphi_2 \in \Phi, d_1, d_2 \in D, z_1, z_2 \in Z$.

При розгляді деяких класів штучно створених гетерогенних матеріалів вводять також додатково як параметр структури орієнтацію складових у просторі, але через особливості виготовлення деталей вузлів тертя з металу технологічно забезпечити створення заданої орієнтації складових у визначеному напрямку важко, тому приймають її в загальному випадку хаотичною. В цьому зв'язку обмежимося при описі матеріалу металічних тіл трьома вищеведеними параметрами.

Розглянемо тіло K з граничною підсистемою ∂K , яке перебуває в умовах фрикційного навантаження. Поведінку тіла будемо описувати відносно до трьохвимірного евклідового простору. Поставимо у відповідність системі $K \cup \partial K$ область евклідового простору $X \cup \partial X$, причому вважаємо, що цей взаємозв'язок є однозначним:

$$K \cup \partial K \Leftrightarrow X \cup \partial X. \quad (1)$$

Орієнтуючись на вихідну геометричну конфігурацію запишемо:

$$\int_{X_0} \varepsilon dV = - \int_{\partial X_0} \vec{n} \cdot \vec{J}_\varepsilon d\Sigma, \quad (2)$$

де $\varepsilon(\vec{r}_0)$ – густина повної енергії, $\vec{J}_\varepsilon(\vec{r}_0)$ – вектор густини зовнішнього навантаження, $\vec{n}(\vec{r}_0)$ – зовнішня нормаль у довільній точці до елементарної поверхні $\partial\delta X \subset \partial X$, $d\Sigma$ – площа цієї поверхні.

Вектор густини зовнішнього навантаження для випадку контактної взаємодії при терті представимо у вигляді лише механічного навантаження:

$$\vec{J}_\varepsilon = \vec{J}_A, \quad (3)$$

де \vec{J}_A – вектор механічного навантаження.

Через особливості процесу фрикційної взаємодії зовнішнє навантаження тіла проходить не по всій поверхні тіла, а лише в плямах контакту; в іншій частині поверхні тіло вважається ізольованим [8, 11]. Сумарна площа плям контакту займає незначну частину загальної площі тіла і становить, в залежності від виду контактної взаємодії, $10^{-3} \dots 10^{-1}$ всієї площі тіла [11].

Представимо загальну поверхню тіла у вигляді об'єднання двох областей:

$$\partial K = \partial K^* \cup \partial K^{**}, \quad (4)$$

де ∂K^* – область поверхні тіла, в якій відбувається фрикційний контакт, ∂K^{**} – область поверхні тіла, в якій контакт відсутній.

$$\partial K^* = \bigcup_i \partial K_i^*, \quad (5)$$

де ∂K_i^* – елементарна область контакту – пляма контакту.

Орієнтуючись на конфігурацію тіла в евклідовому просторі, запишемо:

$$\vec{J}_A|_{\partial X^{**}} \equiv 0; \quad (6)$$

$$\vec{J}_A|_{\partial X^*} = \vec{J}_A(x, t). \quad (7)$$

Нехай на мезорівні область X з границею ∂X містить в собі множину неперетинних областей X_K , що обмежені поверхнями ∂X_K . Для бінарних гетерогенних систем частина $X_1 = \sum X_K$ області заповнена однорідним в межах X_K матеріалом з властивостями \dot{A}^1 (перша фаза), а інша частина області $X_2 = X - X_1$ – однорідним матеріалом з властивостями \dot{A}^2 . Багатозв'язна поверхня ∂X_{12} є міжфазною поверхнею, що розділяє структурні елементи системи.

Якщо відома інформація про взаємний розподіл областей X_K і задані феноменологічні моделі фаз, то вважають, що побудована модель описує кусково-неоднорідне середовище [13].

Прийmemo, що для кожного з компонентів матеріалу, що знаходиться в області X , задане поле тензора напружень:

$$\dot{\sigma}(x) = F\left(\dot{A}(x), (\vec{\nabla}_0 \otimes \vec{u})^s\right), \quad (8)$$

де $\dot{A}(x)$ – тензор властивостей матеріалу, $x \in X$.

При побудові рівнянь рівноваги в області X , будемо вважати, що дія масових сил відсутня:

$$\vec{\nabla}_0 \cdot \dot{\sigma} = 0. \quad (9)$$

На границі ∂X_{12} задамо умови неперервності переміщень і нормальних складових тензора напружень:

$$(u_i(x))^+ = (u_i(x))^-;$$

$$(\sigma_{ij}(x)n_j(x))^+ = (\sigma_{ij}(x)n_j(x))^- \quad (10)$$

Рівняння (8) – (10) разом з граничними умовами (6), (7) складають повну систему рівнянь для області X .

В результаті зовнішнього силового впливу в матеріалі тіла K виникає поле напружень, яке зумовлює процеси руйнування і зношування його приповерхневих шарів. Зміни, які виникають в матеріалі приповерхневого шару в процесі контактної взаємодії, можуть призводити до змін характеру зношування, при яких буде різний механізм руйнування поверхонь.

При моделюванні поведінки контактуючої системи в умовах зношування при терті найважливішим є вибір критерію міцності при заданому виді руйнування [9], який повинен відповідати найбільш яскраво вираженому за даних умова роботи вузла тертя процесу руйнування.

При цьому критерій міцності має відповідати наступним основним вимогам [17]: 1) визначити умову руйнування середовища, що знаходиться в довільному напруженому стані; 2) мати форму інваріанти, що утворена з компонентів тензора напружень і компонентів тензора, який характеризує властивості середовища; 3) аналітичний вираз критерію може бути інтерпретований у виді граничної поверхні в просторі головних напружень; 4) при збільшенні констант міцності для середовища даного типу гранична поверхня в просторі головних напружень має розширюватись так, щоб попередня гранична поверхня була всередині нової, причому дві поверхні можуть лише дотикатись, але не перетинатись.

Більшість часу вузол тертя функціонує при стаціонарному режимі [12, 20], який характеризується зношуванням приповерхневих шарів металічних фрикційних систем в результаті втомного багаточиклового і абразивного руйнування.

Для опису процесу зношування гетерогенних металічних систем виберемо критерій, який дозволяє описувати одночасно поведінку матеріалів в умовах як втомного, так і абразивного руйнування [9, 10]. За цим критерієм руйнування матеріалу тіла в області відбувається тоді, коли деяка функція-критерій, яка залежить від поля напружень, є рівною або перевищує характеристичне значення міцності матеріалу в цій області, яке відповідає заданому виду руйнування:

$$\Phi(\dot{\sigma}(x)) \geq \Phi^*(x), \quad (11)$$

де $\Phi(\dot{\sigma}(x))$ – функція-критерій, яка залежить від значення тензора напружень, $\Phi^*(x)$ – функція, яка описує характеристичне значення міцності матеріалу, $x \in X$.

Введемо індикаторну функцію $r(x)$, яка вказує на наявність руйнування в даній точці:

$$r(x) = \begin{cases} 1, & \Phi(\dot{\sigma}(x)) - \Phi^*(x) \geq 0; \\ 0, & \Phi(\dot{\sigma}(x)) - \Phi^*(x) < 0. \end{cases} \quad (12)$$

Якщо $r(x) = 1$ – руйнування матеріалу в даній точці тіла відбулось, $r(x) = 0$ – руйнування матеріалу в даній точці тіла немає.

Функція $r(x)$ являє собою кусково-неперервну функцію, отже існує інтеграл:

$$R = \frac{1}{\int_X dV} \cdot \int_X r(x) dV, \quad (13)$$

який ми будемо називати мірою руйнування в області X . Функція (13) являє собою відносний об'єм зруйнованого тіла при заданому критерії руйнування (11).

Задача створення і забезпечення функціонування контактуючої системи в умовах тертя полягає у виборі функцій $\phi_1, \phi_2, d_1, d_2, z_1, z_2$ з допустимої множини значень Φ, D, Z для мінімізації функціонала (13) при заданих граничних умовах (6), (7) і рівнянні рівноваги всередині досліджуваної області (9). Дана постановка задачі дозволяє шукати оптимальні розв'язки не тільки в усьому матеріалі контактуючої системи, але і в локальній області; при цьому відбувається лише незначна зміна крайових умов.

Розв'язання поставленої задачі

Розв'язання сформульованої задачі будемо шукати для матеріалу гетерогенної металічної контактуючої системи – бабіту Б16. Технологія його виготовлення, хімічний склад, особливості будови структури, дослідження на зносостійкість детально описані в роботі [4].

У зв'язку з відсутністю в літературних джерелах даних про механічні властивості структурних складових бабіту були проведені дослідження для модельного сплаву, що складається з Pb і фази SnSb [15 – 17]. Основні механічні властивості складових бабіту, які з літературних джерел, наведені в табл. 1.

Дослідження проводили для локальної одичної області контакту, при врахуванні силового впливу. Розрахунок проводився для фрагменту зразка матеріалу з оптимальним вмістом твердої фази на рівні 56,34 %, яка була отримана за допомогою розробленої авторами імітаційної моделі структури матеріалів бінарних гетерогенних металічних систем, що викорис-

товуються у вузлах тертя [12]. Вплив сусідніх плям контакту на зразок для спрощення задачі не враховували. Відмітимо, що врахування дії

сусідніх плям контакту корегує результат лише на 3...5 % [8].

Таблиця 1

Механічні властивості структурних складових бабіту Б16

№	Механічна характеристика	Одиниця вимірювання	Складова	
			Pb	SnSb
1	Модуль пружності	ГПа	16,2	50
2	Коефіцієнт Пуассона		0,446	0.33
3	Густина	кг/м ³	11400	6960
4	Границя міцності при розтягу	Н/м ²	12·10 ⁶	86·10 ⁶
5	Границя текучості	Н/м ²	6·10 ⁶	75·10 ⁶

Було проведено вивчення поведінки матеріалу в постановці одної з найпоширеніших задачі трибомеханіки – локального одиничного фрикційного силового навантаження фрагменту півпростору [10]. Для цього виділили в гетерогенному матеріалі комірку представницького матеріалу – тобто такий фрагмент матеріалу, характеристики якого можна співставити з усім матеріалом. Механічний контакт з матрицею вважаємо ідеальним. Фрагмент матеріалу закріпили на границях області, а в локальній області задали вертикальне розподілене навантаження \vec{p} (рис. 1).

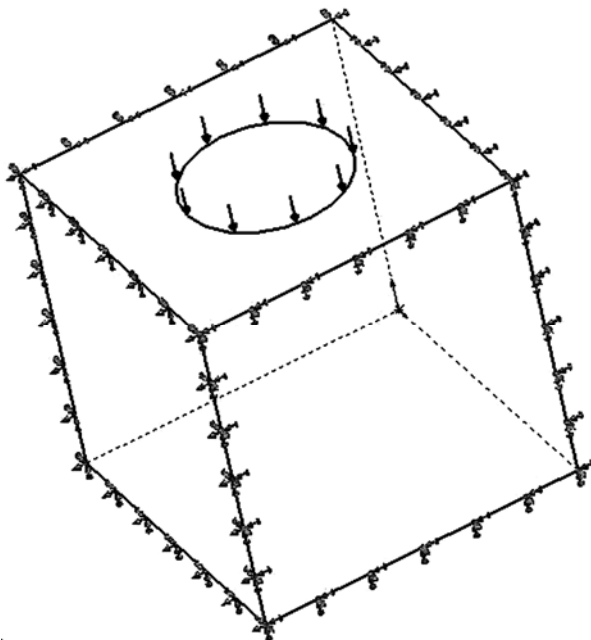


Рис. 1. Постановка задачі для фрагменту гетерогенного матеріалу

Модельне дослідження фрагменту проводили для трьох різних випадків: 1) розмір твердої складової в 2 рази менше розміру плями контакту; 2) тверда складова рівна за розміром плямі

контакту; 3) розмір твердої складової в 2 рази більше розміру плями контакту.

Для чисельного розв'язку поставленої задачі був використаний модуль скінчено-елементного аналізу CosmosWorks, який інтегрований в програмний комплекс SolidWorks [1].

При побудові розв'язку задачі використаємо механічні властивості складових модельного сплаву (табл. 1), вважаючи їх властивості ізотропними. Було задано параметри сітки скінчених елементів зі середнім розміром скінченого елемента 3 мкм, похибка обчислень становила близько 4,5 %.

Вивчення поведінки досліджуваних фрагментів матеріалів проводили при однаковому значенні розподіленого навантаження $|\vec{p}| = 7$ МПа, що дозволяє моделювати поведінку зразка в умовах абразивного руйнування.

Для побудови розв'язку прийемо наступну фізичну модель: 1) матеріал складових будемо вважати пружно-пластичним середовищем, що підпорядковується закону деформаційної теорії пластичності; 2) при записі визначальних рівнянь використаємо симетричну теорію механіки деформівного твердого тіла [6].

В результаті отримаємо наступні поля напружень та розподіл зон пластичності (рис. 2).

При фрикційній взаємодії тіл, які характеризуються суттєво різною твердістю реалізується абразивне зношування, коли нерівності більш твердого тіла витісняють або видаляють м'який матеріал з-під доріжки тертя. В зв'язку з цим в якості критерію руйнування в точці виберемо умову виникнення пластичних деформацій:

$$\sigma_s \geq T, \quad (14)$$

де σ_s – величина еквівалентних напружень за Мізесом, T – межа текучості [9].

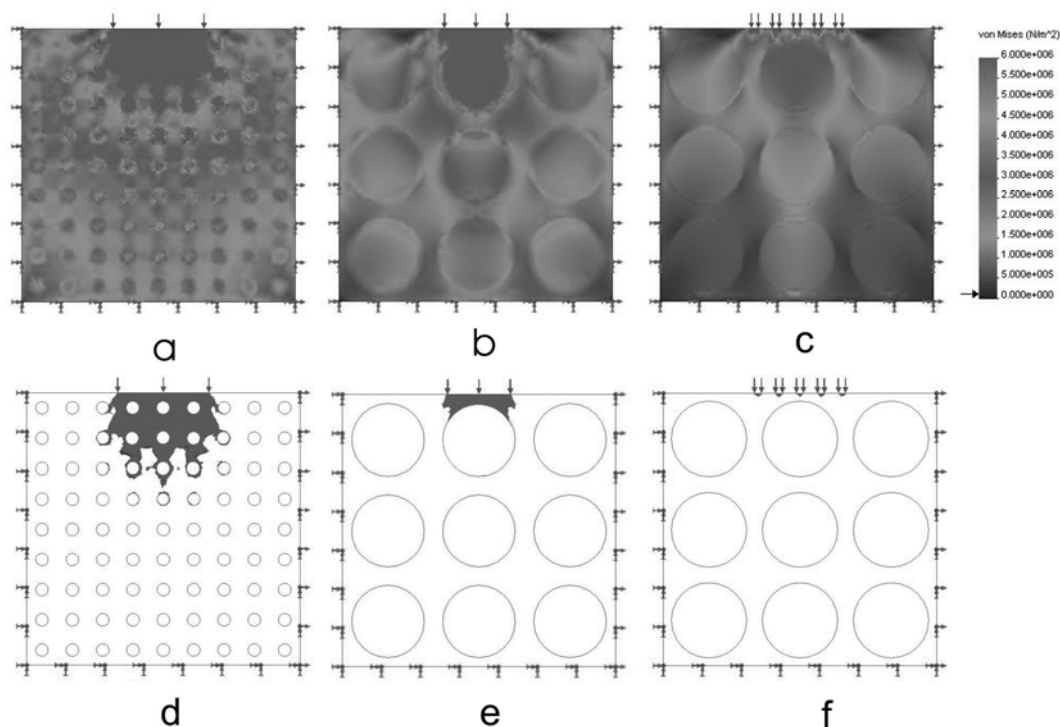


Рис. 2. Поля напружень (a, b, c) та зони пластичності (d, e, f), що виникають в досліджених зразках: a, d – зразок, в якому тверда складова набагато менша плями контакту; b, e – зразок, в якому тверда складова рівна за розміром плями контакту; c, f – зразок, в якому тверда складова набагато більша плями контакту

Зобразимо графічно функцію – міру руйнування, яка описує абразивне зношування досліджуваних фрагментів сплаву – в залежності від розміру твердої складової (рис. 3).

При апроксимації функції – міри руйнування – за допомогою полінома отримаємо наступну залежність:

$$R(x) = 15,6 - 0,6266666667 \cdot y + 0,006666666667 \cdot y^2, \quad (14)$$

де y – відсотковий вміст твердої складової.

Мінімум функції (14) забезпечується при $y = 47$.

Висновки

1. Аналіз контактної взаємодії при терті бінарних гетерогенних металічних систем дозволив розробити алгоритм визначення оптимального процентного вмісту складових, при яких підвищується зносотривкість антифрикційних сплавів.

2. По розробленому алгоритму з використанням комп'ютерних моделей структури і методу скінчених елементів встановлено, що вміст фази SnSb, при якій зростає зносостійкість сплаву, складає 56 %. З використанням побудованої варіаційної моделі механіки контактної взаємодії металічних систем в умовах

тертя показано, що для оптимального вмісту зміцнюючої фази SnSb її середній розмір 47 мкм забезпечує максимальне зростання зносостійкості приповерхневого шару дослідженого сплаву

3. Отримані результати відповідають дослідженням зносостійкості сплаву Б16.

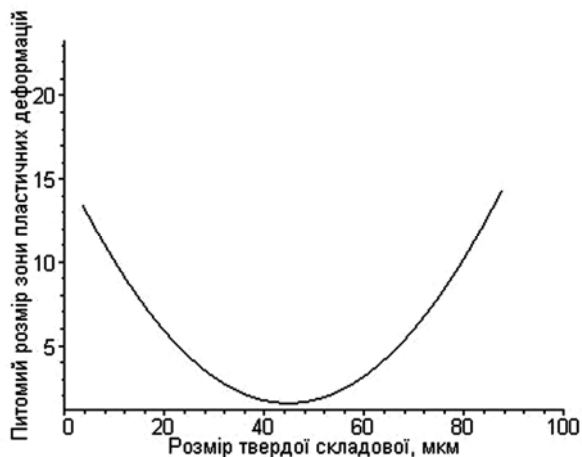


Рис. 3 Залежність функції – міри руйнування – від розміру твердої складової

БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Алямовский, А. А. SolidWorks/CosmosWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов [Текст] / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.

2. Белоусов, В. Я. Физико-химические характеристики композиционных материалов на основе карбида вольфрама [Текст] / В. Я. Белоусов // ФХММ. – 1979. – № 5. – С. 95-97.
3. Бурак, Я. Й. Вибрані праці [Текст] / Я. Й. Бурак. – Львів: НУЦММ ІППММ ім. Я. С. Підстригача НАН України, Вид-во «Ахіл», 2001. – 352 с.
4. Бурак, Я. Й. Технологічне підвищення стійкості проти спрацювання підшипників ковзання шляхом оптимізації параметрів структури металічних систем [Текст] / Я. Й. Бурак, М. О. Кузін, О. Кузін // Машинознавство. – 2006. – № 4. – С. 106-110.
5. Бурак, Я. Й. Вплив структури бабіту на напружено-деформований стан в області контактної взаємодії при терті [Текст] / Я. Й. Бурак, М. О. Кузін // ФХММ. – 2007. – № 6. – С. 27-30.
6. Васидзу, К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности [Текст] / К. Васидзу. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
7. Подстригач, Я. С. Введение в механику поверхностных явлений в деформируемых твердых телах [Текст] / Я. С. Подстригач, Ю. З. Повстенко. – К.: Наук. думка, 1985. – 200 с.
8. Гаркунов, Д. Н. Триботехника (износ и безызносность) [Текст] : учебник. – 4-е изд., перераб. и доп. / Д. Н. Гаркунов – М.: Изд-во МСХА, 2001. – 616 с.
9. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия [Текст] / И. Г. Горячева. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
10. Трощенко, В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении [Текст] / В. Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1981. – 344 с.
11. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия [Текст] : пер. с англ. / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
12. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
13. Кузін, М. Імітаційні моделі структури для розрахунку параметрів ферито-перлітних сталей з підвищеною зносостійкістю [Текст] / М. Кузін // Наук. записки Української академії друкарства. – 2007. – № 11 (1). – С. 15-22.
14. Кузін, М. О. Аналіз впливу параметрів структури матеріалу приповерхневих шарів контактуючих систем на їх зносостійкість [Текст] / М. О. Кузін // Конф. молодих вчених із сучасних проблем механіки і математики ім. акад. Я. С. Підстригача, Львів. – 2005. – С. 112-113.
15. Кузін, М. О. Роль структури бабіту у формуванні напружено-деформованого стану в області контактної взаємодії підшипників ковзання тягового рухомого складу [Текст] / М. О. Кузін, В. В. Ступницький, Т. М. Мещерякова // Тези 67 Міжн. наук.-практ. конф. «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту». – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2007.
16. Кузін, О. А. Роль структури в процесах зношування бабіту Б16 [Текст] / О. А. Кузін, І. В. Курило, М. О. Кузін // МОМ. – 2007. – С. 14-18.
17. Матвиенко, Ю. Г. Модели и критерии механики разрушения [Текст] / Ю. Г. Матвиенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 328 с.
18. Мещерякова, Т. М. Використання методу імітаційного моделювання для оцінки впливу параметрів структури на зносостійкість підшипників ковзання двигунів магістральних електропозів [Текст] / Т. М. Мещерякова, М. О. Кузін // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 21. – Д.: Вид-во ДНУЗТ, 2008. – С. 272-278.
19. Петросянц, А. А. Повышение долговечности деталей газонефтепромышленного оборудования [Текст] / А. А. Петросянц, В. Я. Белоусов, В. С. Саркисов. – М.: Недра, 1979. – 110 с.
20. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения [Текст] : учебник для вузов / под ред. Д. Г. Громаковского. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2000. – 268 с.
21. Фізико-математичне моделювання складних систем [Текст] / під ред. Я. Й. Бурака, Є. Я. Чаплі. – Львів: Сполом, 2004. – 264 с.

Надійшла до редколегії 26.03.2009.