

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

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ СТРУКТУРИ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ ДВИГУНІВ МАГІСТРАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

З використанням методу імітаційного моделювання структури проведено аналіз впливу кількості твердої фази на параметри зносостійкості антифрикційного сплаву Б16. Розроблена методика оптимізації лінійної інтенсивності зношування в залежності від кількісного співвідношення між структурними складовими матеріалу, отримані розрахункові дані корелюють з результатами випробовувань на зносостійкість.

С использованием метода имитационного моделирования структуры проведен анализ влияния количества твердой фазы на параметры износостойкости антифрикционного сплава Б16. разработана методика оптимизации линейной интенсивности изнашивания в зависимости от количественного соотношения между структурными составляющими материала, полученные расчетные данные коррелируют с результатами испытаний на износостойкость.

A method of structure simulation was used to investigate the influence of the hard phase quantity on parameters of the wear resistance of antifriction alloy B16. A method of optimization of linear intensity of wear depending on the quantitative correlation between the structural components is developed; the calculation data obtained correlate with the results of the wear resistance tests.

В тягових двигунах локомотивів, що експлуатуються на залізницях України, використовуються бабітові вкладиші підшипників ковзання (рис. 1). Матеріал бабітового підшипника ковзання – це відносно пластична і в'язка основа з включенням твердих опорних часточок.

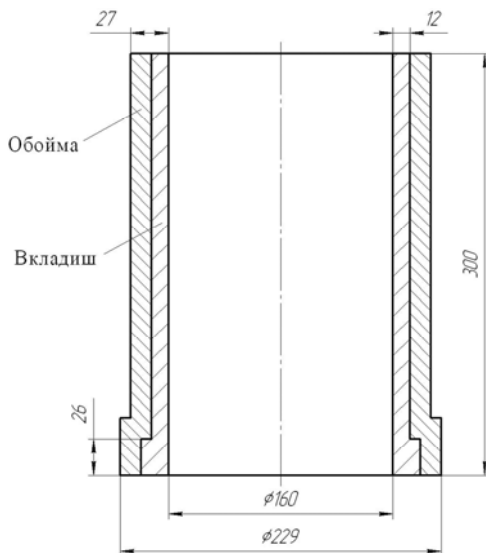


Рис. 1. Схема підшипника ковзання тягового двигуна магістрального електровоза, отриманого відцентровим литтям

В умовах тертя зношується пластична основа, а вал контактуватиме з твердими включеннями. Перевагами бабітових підшипників ков-

зання є можливість повторного використання їх матеріалу для виготовлення нових вкладишів вузлів тертя.

Виготовлення і ремонт деталей вузлів тертя тягових електродвигунів проводять методом відцентрового лиття.

Дана робота присвячена питанню вивчення впливу параметрів структури матеріалу вкладиша підшипника ковзання, який виготовлений з бабіту Б16, на його зносотривкість.

При виготовленні вкладиша підшипника використовують установки відцентрового литва з горизонтальною віссю обертання (рис. 2).

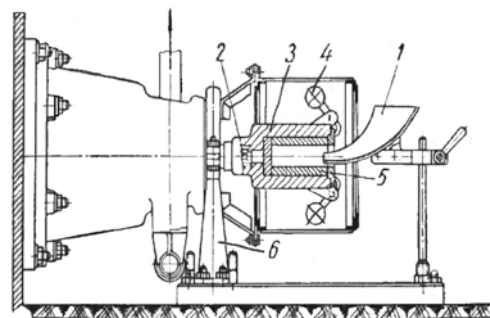


Рис. 2. Схема установки для отримання вкладиша підшипника ковзання: 1 – заливочна воронка; 2 – шток виштовхувача; 3 – виливниця; 4 – відцентровий затвор; 5 – виливок; 6 – упорний люнет

Відцентрові сили суттєво впливають на формування структури, оскільки до складу бабіту

входять фази з різними фізико-хімічними властивостями. Хімічний склад бабіту Б16 наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад бабіту Б16

Sb, %	Cu, %	Sn, %	Pb, %
15...17	1,5...2	15...17	основа

Фазовий склад сплаву складається з фаз типу: тверді включення – кристали фази SnSb матриця – свинець. Ці фази різняться за своєю питомою вагою: SnSb – $6,3 \text{ г/см}^3$ (визначено графічним методом), Pb – $11,34 \text{ г/см}^3$.

Різниця в густині приводить до того, що на частинки свинцю і зміцнюючої фази діє різне значення відцентрової сили. В результаті утворюється неоднорідна структура по перерізу вилівка, оскільки значення відцентрової сили для Pb в 1,79 рази більша, ніж для SnSb (рис. 3).

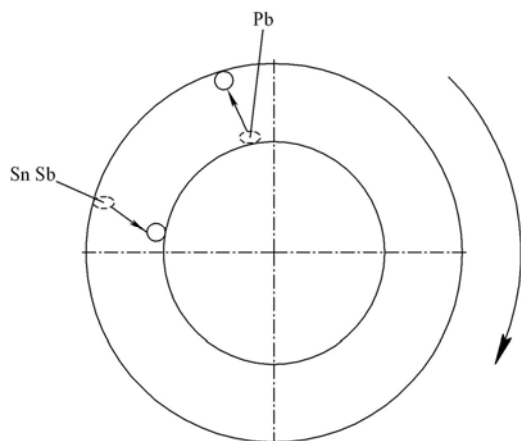


Рис. 3. Схема руху частинок в структурі бабіту Б16 при відцентровому литті

В зв'язку з цим проводили аналіз мікроструктури, визначали механічні властивості і зносостійкість сплаву по товщині вкладиша підшипника ковзання. Мікроструктурний аналіз підтвердив наявність зональної неоднорідності по товщині вкладиша, яку умовно можна поділити на три структурні зони. Перша зона, наближена до поверхні контактної взаємодії, містить найбільшу кількість зміцнюючої фази, яка в деяких ділянках утворює суцільний шар, а м'яка матриця розташована у вигляді окремих ділянок (рис. 4).

У другій зоні зростає кількість ділянок м'якої складової, які утворюють навколо зміцнюючої фази суцільні оторочки або окремі ділянки (рис. 5 а, 5 б).

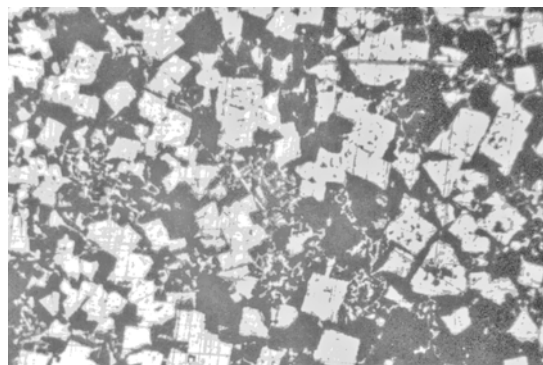


Рис. 4. Мікроструктура вкладиша підшипника з бабіту Б16 біля краю контактної взаємодії отриманого відцентровим литтям (зона 1), x125

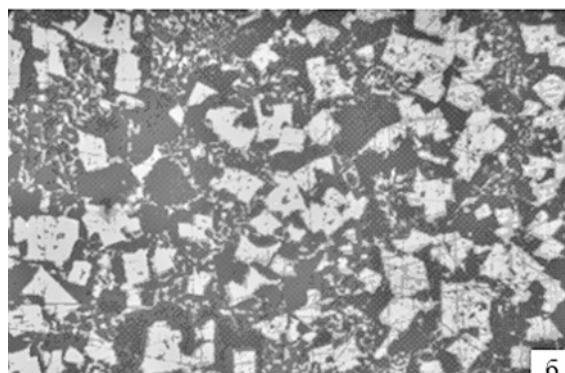
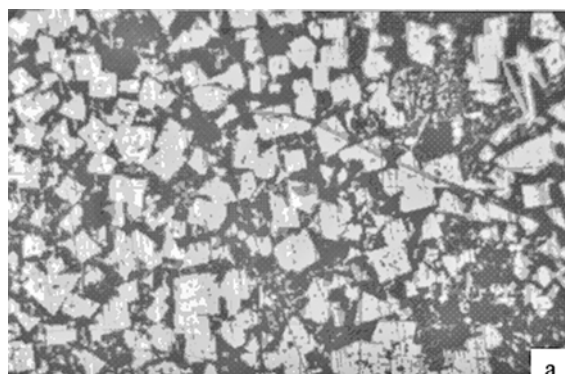


Рис. 5. Мікроструктура вкладиша підшипника з бабіту Б16, отриманого відцентровим литтям (зона 2); світлі включення – зміцнюючі фази SnSb і Cu_3Sn , окремі голки – Cu_2Sb ; темні ділянки – твердий розчин на основі свинцю, x125: а – $\approx 4600 \text{ мкм}$; б – $\approx 5200 \text{ мкм}$ (від краю контактної взаємодії)

В третій зоні зустрічаються окремі часточки зміцнюючої фази, які в окремих місцях виходять на зовнішню поверхню вкладиша підшипника ковзання (рис. 6 а, 6 б). Аналіз результатів показав різне значення кількості зміцнюючої фази в досліджених зонах. Вміст зміцнюючої фази в зоні I коливається від 74 % до 43 %; в зоні II – від 60 % до 11 %; в зоні III – вміст включень з 11 % поступово зменшується до нуля і біля зовнішнього діаметра вкладиша структура складається з матриці – Pb (рис. 7).

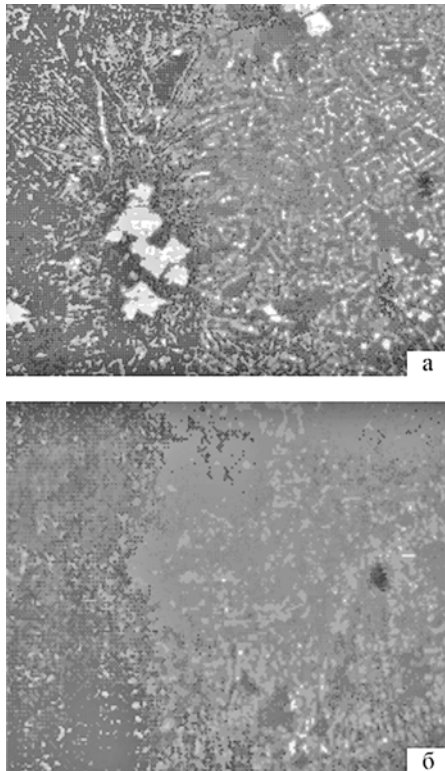


Рис. 6. Мікроструктура вкладки підшипника з бабіту Б16, отриманого відцентровим литтям (зона 3), $\times 125$: а – ≈ 14800 мкм; б – ≈ 16000 мкм (від краю контактної взаємодії)

Для вивчення впливу параметрів структури бабіту Б16 на його зносостійкість використали метод імітаційного моделювання. При аналізі поведінки бабіту Б16 в умовах тертя представляли його матеріал як гетерогенне (неоднорідне) середовище. Опис поведінки матеріалу в умовах тертя проводили з використанням ієрархічних багаторівневих моделей механіки деформованого середовища.

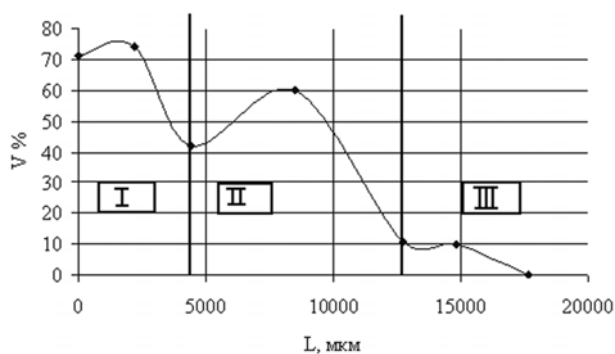


Рис. 7. Вміст зміцнюючої фази в бабіті Б16 по товщині вкладки підшипника ковзання від поверхні контактної взаємодії

Розглядалися наступні варіанти структурних рівнів, що спираються на системи масштабних

факторів, які відповідають різним ієрархічним розмірам фізичних об'єктів: а) рівень елементарних об'ємів компонентів (мікрорівень); б) рівень елементів структури (мезорівень); в) рівень ефективних характеристик (макрорівень).

На рівні елементарного мікрооб'єму (мікрорівні) вибирається такий об'єм матеріалу, розміри якого набагато більші міжатомних віддалей, але менші характерних розмірів фазових складових сплаву. На цьому рівні справедливі положення механіки суцільного ізотропного середовища. На мезорівні розглядається об'єм матеріалу, розміри якого складали 10^2 розміру структурних компонент. Мезорівень являє собою фрагмент кусково-неоднорідного середовища. На макрорівні матеріал розглядається як квазіоднорідне середовище, властивості якого за просторовими координатами змінюються достатньо повільно, що дозволяє приймати їх постійними в околі характерних точок. Такий матеріал характеризується ефективними властивостями, які є узагальненням інформації про поведінку матеріалу на мезорівні. Характерні розміри області, яка аналізується, є 10^2 - 10^3 розмірів структурних складових, які можуть бути співставленні з усім матеріалом.

Вхідними параметрами при побудові імітаційної моделі в роботі були наступні: 1) відсоткове співвідношення структурних складових; 2) набір параметрів, які характеризують форму і розміри складових; 3) розподіл структурних складових за розмірами. Метод імітаційного моделювання дозволив побудувати фрагмент структури матеріалу за вищевказаними параметрами.

За допомогою імітаційної моделі були побудовані фрагменти мезоструктур, які відповідають 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 % вмісту твердої складової в бабітах (рис. 8).

В дослідженому модельному матеріалі модуль пружності м'якої складової вибрали на рівні 23,5 ГПа (прийняли рівним модулю пружності свинцю), а модуль пружності твердої складової прийняли як середнє значення між модулем пружності олова (58,6 ГПа) і сурми (54,9 ГПа). Визначення коефіцієнта Пуассона фази SnSb проводили аналогічно.

Для визначення і опису механічних властивостей модельного структурно-неоднорідного матеріалу був використаний метод скінчених елементів, а також теорія ефективних властивостей.

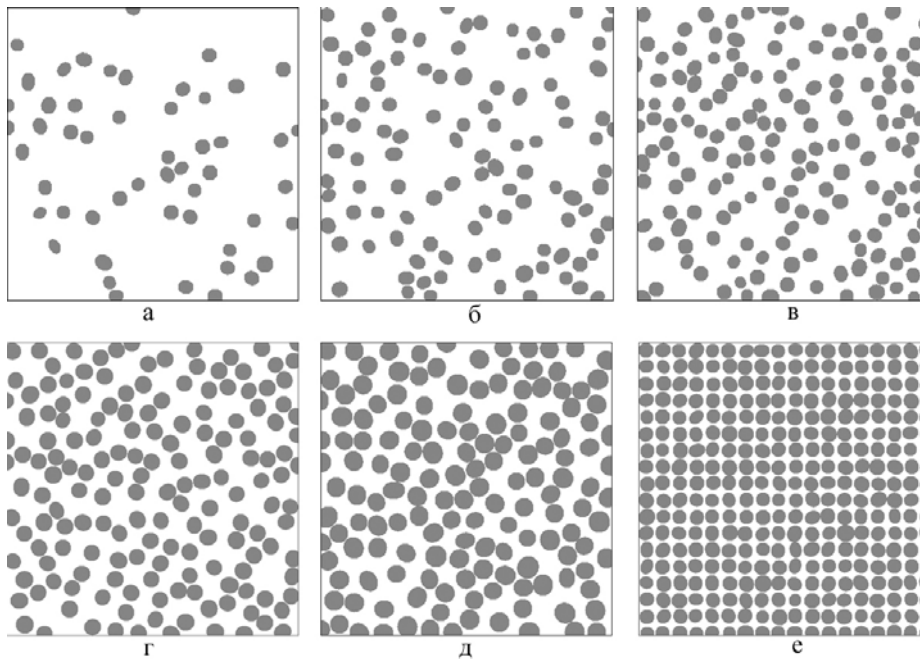


Рис. 8. Імітаційні моделі гетерогенних матеріалів: білий колір – м'яка складова, темний колір – тверда складова; а – 10 % твердої складової; б – 20 % твердої складової; в – 30 % твердої складової; г – 40 % твердої складової; д – 50 % твердої складової; е – 60 % твердої складової

Згідно з цими підходами, 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 (рис. 9).

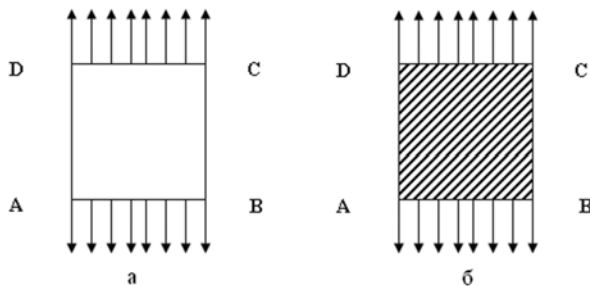


Рис. 9. Граничні умови в чисельному експерименті для визначення ефективних властивостей структурно-неоднорідного матеріалу:
а – фрагмент структурно-неоднорідного матеріалу,
б – еквівалентний однорідний матеріал з ефективними властивостями; граничні умови:

$$A-B, C-D: \sigma_1 = \sigma^*, \tau_{21} = 0;$$

$$B-C, D-A: \sigma_2 = 0, \tau_{12} = 0$$

Умовою еквівалентних реакцій двох матеріалів на зовнішнє навантаження може бути прийнята умова рівності їх питомих енергій деформування:

$$W^{eq} = W^{het}, W^{eq} = \sigma_{ij}(\varepsilon_{ij})d\varepsilon_{ij},$$

$$W^{het} = \frac{1}{V} \left(\sum_k \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} V_k \right), V = \sum_k V_k \quad (1)$$

де W^{eq} – потенційна енергія деформування однорідного матеріалу, W^{het} – потенційна енергія деформування структурно-неоднорідного матеріалу, V_k – об'єм матеріалу, що належать різним структурним компонентам, k – число компонентів з різними фізико-механічними властивостями.

З використанням методу скінчених елементів розроблено програмний комплекс, який дозволяє розраховувати механічні властивості матеріалів в залежності від вмісту структурних складових. При цьому в програмі можна задавати параметри механічних властивостей структурних складових (рис. 10). Результати розрахунків наведені в табл. 2 та на рис. 11, 12.

Показано, що суттєва зміна модуля пружності і коефіцієнта Пуассона спостерігається за наявності в структурі твердої складової в кількості від 40 % до 60 %.

Встановлено функціональні залежності механічних характеристик матеріалу від його структурних складових з використанням поліноміальної інтерполяції [4].

В результаті, за допомогою програми Maple 6.0, були отримані наступні аналітичні залежності механічних характеристик матеріалу від процентного вмісту складових:

$$E(x) = 32.2100 - 2.2415 \cdot x + 0.2617 \cdot x^2 - 0.0114 \cdot x^3 + 0.0002 \cdot x^4 - 1.4175 \cdot 10^{-5} \cdot x^5, \quad (2)$$

$$\mu(x) = 0.5739 - 0.0309 \cdot x + 0.0023 \cdot x^2 - 0.8202 \cdot 10^{-4} \cdot x^3 + 0.1319 \cdot 10^{-5} \cdot x^4 - 0.7867 \cdot 10^{-8} \cdot x^5. \quad (3)$$

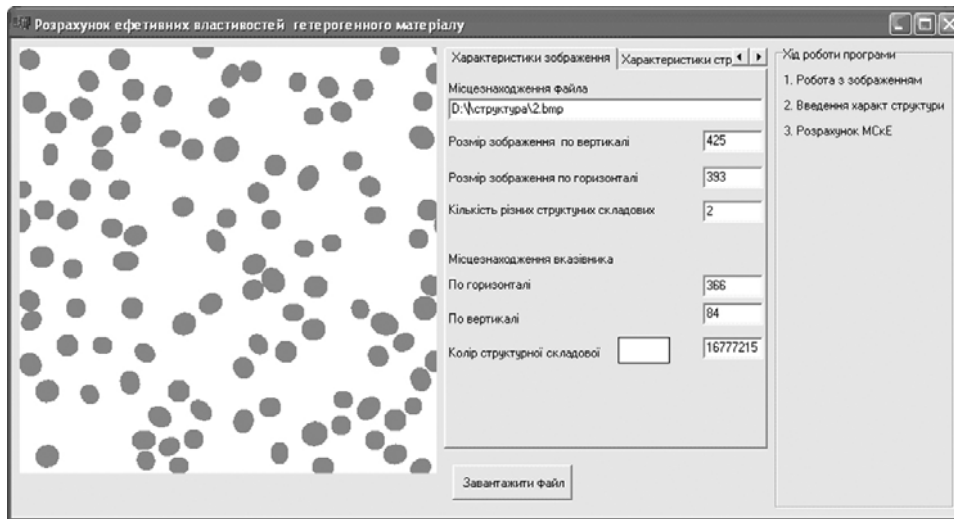


Рис. 10. Інтерфейс програми під час розрахунку гетерогенного фрагменту матеріалу

Таблиця 2

Результати чисельних експериментів з дослідження впливу структури бабіту Б16 на механічні властивості

Номер експерименту	Відсоток		Номер «структури»	Модуль пружності твердої складової, ГПа	Модуль пружності м'якої складової, ГПа	Коефіцієнт Пуасона твердої складової	Коефіцієнт Пуасона м'якої складової	Еквівалентний модуль пружності (результат чисельного експерименту), ГПа	Еквівалентний коефіцієнт Пуасона (результат чисельного експерименту)
	Твердої складової	М'якої складової							
1	10	90	1	56,8	23,5	0,365	0,446	26,57	0,4279
2	20	80	2	56,8	23,5	0,365	0,446	30,56	0,4169
3	30	70	3	56,8	23,5	0,365	0,446	31,39	0,4055
4	40	60	4	56,8	23,5	0,365	0,446	33,45	0,386
5	50	50	5	56,8	23,5	0,365	0,446	41,3	0,384
6	60	40	6	56,8	23,5	0,365	0,446	42,66	0,364



Рис. 11. Залежність модуля пружності матеріалу від відсоткового вмісту твердої (SnSb) і м'якої (Pb) складових



Рис. 12. Залежність коефіцієнту Пуасона матеріалу від відсоткового вмісту твердої (SnSb) і м'якої (Pb) складових

Одержані результати дозволяють визначити контурний тиск P_c і середній фактичний тиск при контакті P_r [4]:

$$P_c = 0.2 \cdot E^{0.8} \left(\frac{H_B}{R_\beta} \right)^{0.4} \cdot P_a^{0.2}, \quad (4)$$

$$P_r = 0.5 \cdot E^{\frac{2V}{2V+1}} \cdot \Delta^{\frac{V}{2V+1}} \cdot P_c^{\frac{1}{2V+1}}, \quad (5)$$

де Δ – комплексна характеристика шорсткості; H_B – висота хвилі; R_β – радіус хвилі; V – параметр опорної поверхні; P_a – номінальний тиск.

Величина цих тисків безпосередньо впливає на лінійну інтенсивність зношування, оскільки згідно [4] вона дорівнює:

$$I = K_1 \cdot \alpha \cdot 2^{\frac{1}{2V}} \cdot P_a \cdot P_c^{\frac{1}{2V}} \cdot P_r^{t-1} \cdot \Delta^{\frac{1}{2V}} \cdot \left(\frac{kf_M}{\sigma_0} \right)^{t_y}, \quad (6)$$

де K_1 – стала, яка залежить від параметрів геометрії нерівностей; α – коефіцієнт перекриття; σ_0 – параметр фрикційної втоми; f_M – молекулярна складова сили тертя.

Проведемо оптимізацію лінійної інтенсивності зношування за відсотковим вмістом твердої складової в гетерогенному матеріалі, вважаючи, що параметри поверхні контакту є заданими:

$$\frac{dI}{dx} = 0, \quad (7)$$

$$x = 56.3445. \quad (8)$$

При заданому значенні x друга похідна $\frac{d^2I}{dx^2} > 0$, тобто забезпечується мінімум інтен-

сивності зношування.

Одержані результати корелюють з дослідженнями підшипника ковзання, отриманого методом відцентрового литва, наведеними в роботі [6]. Як видно, за наявності в структурі 54...58 % твердої фази SnSb зносостійкість бабіту Б16 є найвищою (рис. 13).

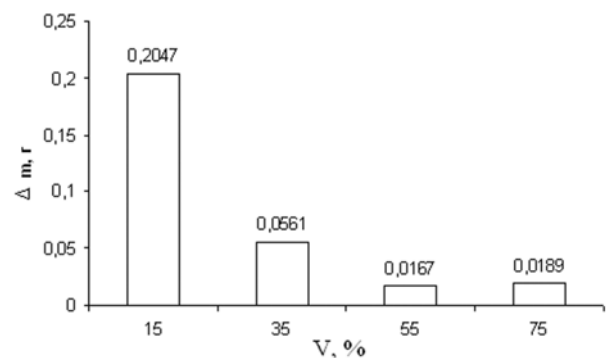


Рис. 13. Вплив кількості фази SnSb на зносостійкість бабіту Б16

Висновки:

1. З використанням уявлень про багаторівневий характер формування механічних властивостей матеріалу контактуючих систем та розробленої імітаційної моделі структури проведено кількісний аналіз впливу твердої складової від 10 до 60 % на модуль пружності і коефіцієнт Пуасона бабіту Б16.

2. Більш точний розрахунок пружних характеристик на основі аналізу механічних властивостей дозволив розробити методику чисельної оцінки лінійної інтенсивності зношування гетерогенного матеріалу із врахуванням його структури.

Проведена оптимізація отриманих залежностей дозволила встановити оптимальний вміст твердої фази в бабіті Б16 на рівні 56,34 %, при якій спостерігається підвищення зносостійкос-

ті, що підтверджується результатами проведених експериментальних досліджень.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Горячева И. Г. Механика фрикционного контактного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
2. Арзамасов Б. И. Материаловедение / Б. И. Арзамасов, И. И. Сидорин, Г. Ф. Косолапов и др. – М.: Машиностроение, 1986. – 384 с.
3. Свойства элементов. Ч. 1. Физические свойства: Справочник, 2-е изд. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
4. Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Т. Корн, Г. Корн. – М.: Наука, 1977.
5. Трение, изнашивание и смазка: Справочник в 2-х кн. / Под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М.: Машиностроение, 1978.
6. Бурак Я. Технологічне підвищення стійкості проти спрацювання підшипників ковзання шляхом оптимізації параметрів структури контактуючих металічних систем / Я. Бурак, М. Кузін, О. Кузін // Машинознавство, 2006. – № 2. – С. 38-43.

Надійшла до редколегії 27.03.2008.