

УДК 620.179.112 : 539.62

М. О. Кузін

ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ СТРУКТУРИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ФЕРИТО-ПЕРЛІТНИХ СТАЛЕЙ З ПІДВИЩЕНОЮ ЗНОСОСТІЙКІСТЮ

Подано результати досліджень процесів зношування ферито-перлітних сталей. Запропонована імітаційна модель структури, яка при використанні методу скінченних елементів дозволяє проводити вибір оптимальної кількості твердої складової в сталі, що забезпечує підвищення її зносостійкості.

Results of research of processes of deterioration ferit-perlit steels are presented. The imitating model of structure which with use of a method of final elements allows to spend a choice of optimum quantity of a firm phase in steel that provides increase of its wear resistance is offered.

Стандартні механічні характеристики матеріалів, які визначаються при випробовуванні на розтяг, стиск або ударний згин, не завжди однозначно корелюють із зносостійкістю деталей пар тертя, що пов'язано з впливом структурно-фазового стану приповерхневих шарів на процеси контактної взаємодії [3—5].

В інженерних підходах серед характеристик матеріалу, що впливають на його зносостійкість, фігурують модуль пружності, коефіцієнт Пуасона та набір констант, які емпірично визначаються для кожного з конкретних матеріалів у заданих режимах експлуатації.

Методи розрахунку кількості плям контакту та їх середньої площі і середньої відстані між ними й інтенсивності зношування за професором Крагельським проводяться за такими формулами [8]:

кількість плям контакту –

$$n_r = \frac{3.1 \times A_c}{K_r \times r \times R_a} \frac{\sigma_c^{0.66}}{\sigma_r}, \quad (1)$$

середня площа плями контакту –

$$DA_r = 0.57 \times (K_r \times r \times R_a)^{0.5} \frac{\sigma_c^{0.33}}{\sigma_r}, \quad (2)$$

де A_c — контурна площа контакту; P_c — контурний тиск; P_r — середній фактичний тиск на контакті; R_a — середнє арифметичне відхилення профілю поверхні; r — приведений радіус нерівностей; K_r — стала, для пластичного контакту рівна 21;

контурний тиск —

$$P_c = 0.2 \times E^{0.8} \frac{\sigma_B^{0.4}}{\sigma_r} \times P_a^{0.2}, \quad (3)$$

фактичний тиск —

$$P_r = 0.5 \times E^{\frac{2V}{2V+1}} \times D^{\frac{V}{2V+1}} \times P_c^{\frac{1}{2V+1}}, \quad (4)$$

де D — комплексна характеристика шорсткості; H_B — висота хвилі; R_b — радіус хвилі; V — параметр опорної поверхні; P_a — номінальний тиск; лінійна інтенсивність зношування —

$$I = K_1 \times a^{\frac{1}{2V}} \times P_a^{\frac{1}{2V}} \times P_c^{\frac{1}{2V}} \times P_r^{t-1-\frac{1}{2V}} \times D^{\frac{1}{2}} \times \frac{a f_M \ddot{o}_y}{\epsilon S_0 \varnothing}, \quad (5)$$

де K_1 — стала, що залежить від геометрії нерівностей; a — коефіцієнт перекриття; S_0 — параметр фрикційної втоми; f_M — молекулярна складова сили тертя.

Як бачимо, при визначенні контурного тиску P_c , середнього фактичного тиску на контакті P_r , крім параметрів шорсткості, використовується значення модуля пружності матеріалу E , який також впливає і на величину лінійної інтенсивності зношування.

Результати, отримані за цими методиками розрахунку, не завжди точно описують процес тертя, бо не враховують таку важливу характеристику контактуючих систем, як структура. Характеристики структури матеріалу, зокрема, процентний вміст складових, їх геометричні характеристики, орієнтація в просторі, можуть змінювати характеристики поведінки матеріалу в умовах контактної взаємодії в широких межах [5]. Саме тому визначення впливу параметрів структури на поведінку матеріалів в умовах роботи є важливим і актуальним завданням.

Прогнозування поведінки матеріалів в умовах контактної взаємодії вимагає визначення їх ефективних фізико-механічних властивостей у локальних мікрооб'ємах — плямах контакту. Для цього потрібно розробити моделі, що забезпечують оцінювання механічних властивостей і поведінки окремих мікрооб'ємів поверхневих шарів матеріалу й одержання нових технологічних методів підвищення стійкості проти зношування деталей.

У цій роботі запропоновано методику оцінки впливу процентного вмісту складових структури матеріалу на його здатність до зношування. Класи матеріалів, на яких перевіряється методика, — бінарні гетерогенні системи, тобто такі, що мають дві складові. Під це визначення підпадають і ферито-перлітні сталі, які після термічної обробки мають структуру ферит — перліт. Ферит — це твердий розчин в α -залізі, перліт — механічна суміш фериту і цементиту, що містить близько 0,8% вуглецю [1, 6]. З точки зору механіки, ферито-перлітні сталі — це бінарні гетерогенні системи, де ферит являє собою м'яку, а перліт — тверду складову.

Аналіз поведінки гетерогенних матеріалів при різних видах контактної взаємодії залежно від параметрів структури вимагає використання ієрархічних

багаторівневих моделей механіки деформівного середовища, які відповідають різним ієрархічним розмірам фізичних об'єктів: елементарних об'ємів компонентів (мікрорівню); елементів структури (мезорівню); ефективних характеристик (макрорівню). На рівні елементарного мікрооб'єму (мікрорівні) вибирали такий об'єм матеріалу, розміри якого набагато більші за міжатомні відстані, але менші за характерні розміри фазових складових сплаву. На цьому рівні справедливі положення механіки суцільного ізотропного середовища. На мезорівні розглядали об'єм матеріалу, розміри якого складали $10 - 10^2$ розміру структурних компонент. Мезорівень являє собою фрагмент кусково-неоднорідного середовища. На макрорівні матеріал розглядали як квазіоднорідне середовище, властивості якого за просторовими координатами змінюються досить повільно, що дозволяє приймати їх постійними в околі характерних точок. Такий матеріал характеризується ефективними властивостями, що є узагальненням інформації про поведінку матеріалу на мезорівні. Характерні розміри аналізованої області становлять $10^2 - 10^3$ розмірів структурних складових, які можуть бути зіставлені з усім матеріалом.

Для оцінки впливу гетерогенності структури на процеси зношування застосували метод імітаційного моделювання. При моделюванні використовували фотографії реальних структур ферито-перлітних сталей (рис. 1). Вхідними параметрами при побудові імітаційної моделі були: процентне співвідношення структурних складових; набір параметрів, які характеризують форму і розміри складових; розподіл структурних складових за розмірами.

Метод імітаційного моделювання дозволив побудувати фрагмент структури матеріалу за вищенаведеними параметрами. За допомогою імітаційної моделі було побудовано фрагменти структур, які відповідають 10, 20, 30, 40, 50, 60% вмісту перліту в сталях (рис. 2). Значення модуля пружності перліту прийняли рівним 209 ГПа, а фериту — 186 ГПа [7].

Для визначення й опису механічних властивостей модельного структурно-неоднорідного матеріалу використовували метод скінченних елементів, а також теорію ефективних властивостей. Згідно з цими підходами, якщо реакція структурно-неоднорідного матеріалу на зовнішнє навантаження еквівалентна реакції деякого однорідного матеріалу, що знаходиться в аналогічних умовах навантаження, то властивості такого матеріалу можуть бути прийняті як ефективні властивості структурно-неоднорідного матеріалу (рис. 3).

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

$$W^{eq} = W^{het}, \quad dW^{eq} = s_{ij}(e_{ij}) de_{ij}, \quad W^{het} = \frac{1}{V} \sum_k \frac{\partial}{\partial e_k} s_{ij} e_{ij} V_k, \quad V = \sum_k V_k, \quad (6)$$

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

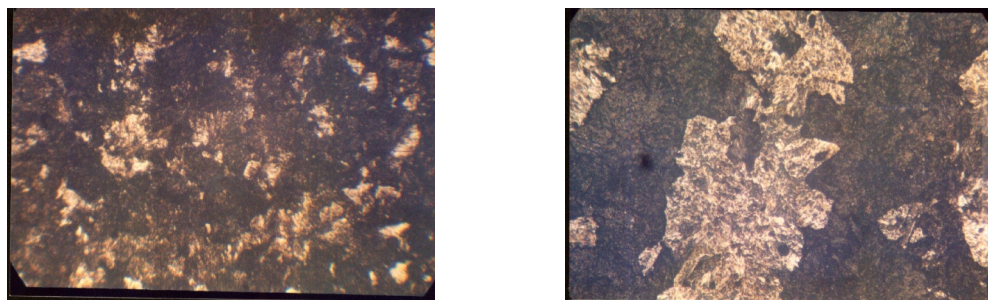


Рис. 1. Мікроструктура ферито-перлітних сталей (x280)

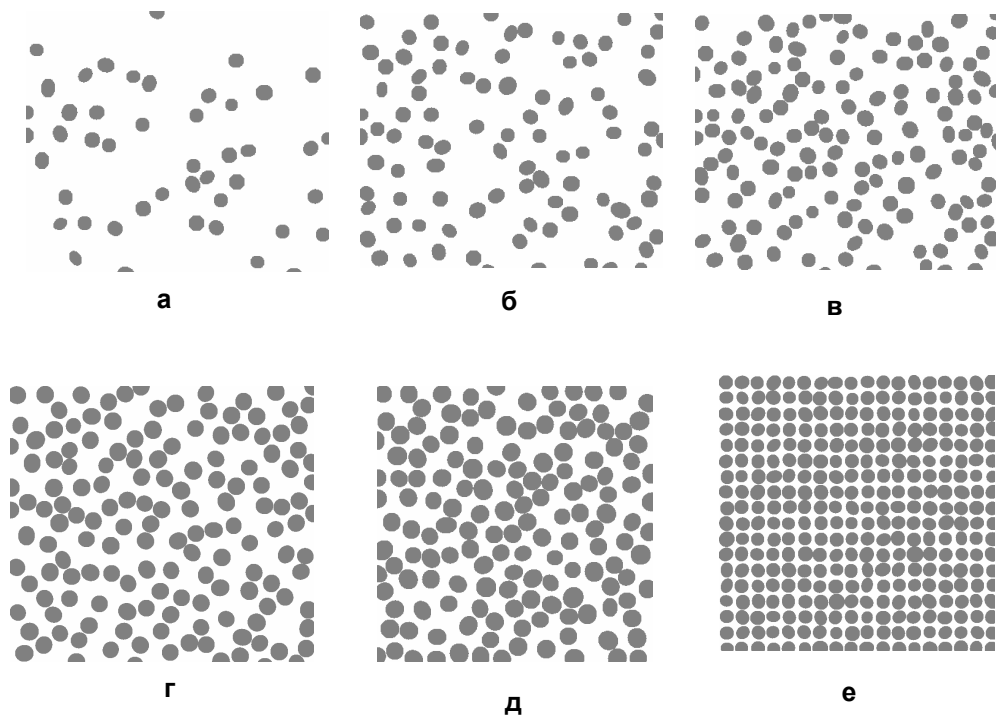


Рис. 2. Імітаційні моделі бінарних гетерогенних матеріалів:

білий колір – м'яка складова (ферит);
 темний колір – тверда складова (перліт);
 а, б, в, г, д, е – 10, 20, 30, 40, 50, 60% твердої
 складової відповідно

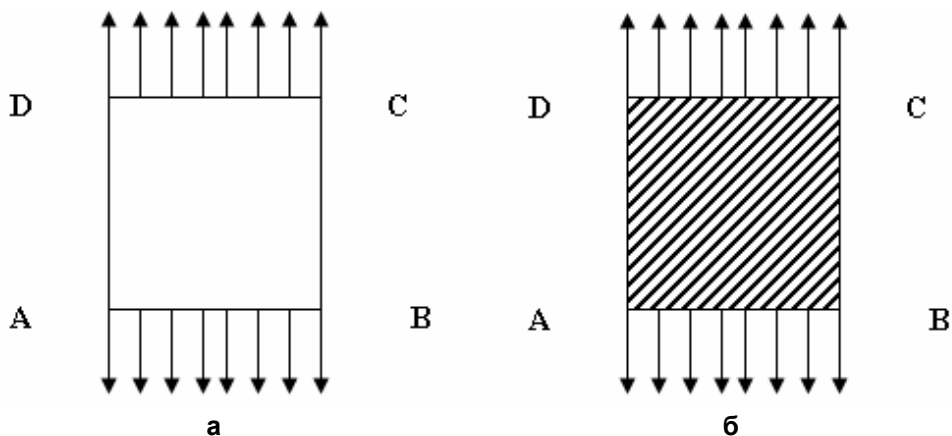


Рис. 3. Граничні умови в чисельному експерименті для визначення ефективних властивостей структурно-неоднорідного матеріалу:
а – фрагмент структурно-неоднорідного матеріалу; б – еквівалентний однорідний матеріал з ефективними властивостями; граничні умови:

$$A - B, C - D: s_1 = s^*, t_{21} = 0; B - C, D - A: s_2 = 0, t_{12} = 0$$

Розроблено програмний комплекс, який дозволяє розраховувати механічні властивості матеріалів залежно від вмісту структурних складових. При цьому в програмі можна задавати параметри механічних властивостей структурних складових (рис. 4).

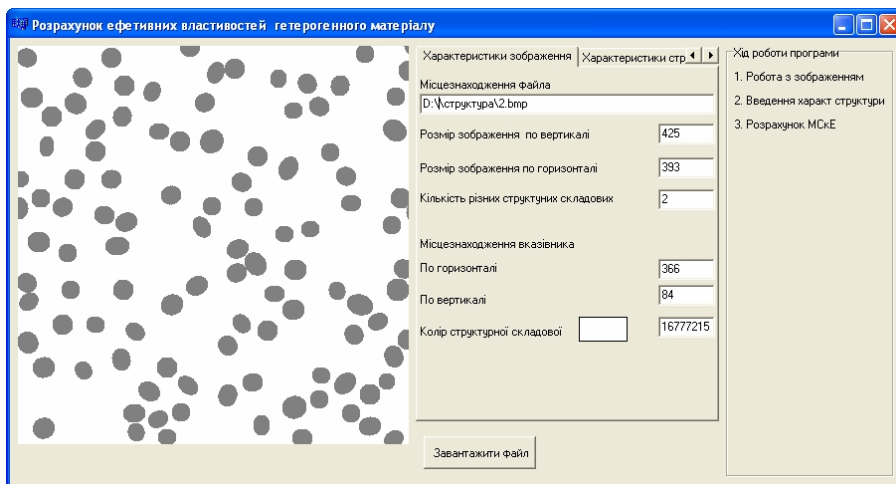


Рис. 4. Інтерфейс програми для розрахунку гетерогенного фрагмента матеріалу

Результати розрахунків модуля пружності бінарної гетерогенної системи наведено в таблиці і на рис. 5.

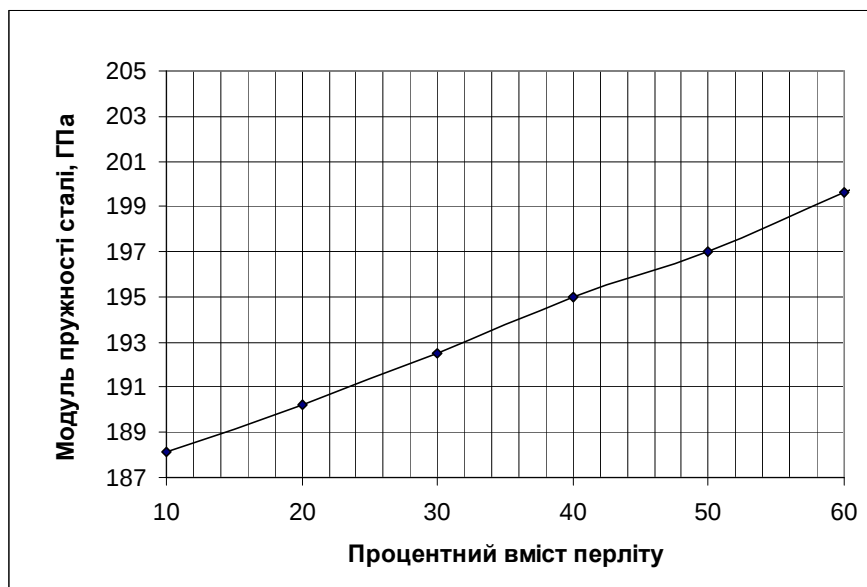


Рис. 5. Залежність модуля пружності матеріалу від вмісту перліту

Результати чисельних експериментів з дослідження впливу структури ферито-перлітної сталі на її модуль пружності

Номер експерименту	Процент		Номер структури	Модуль пружності, ГПа		Еквівалентний модуль пружності (результат чисельного експерименту), ГПа
	перліту	фериту		перліту	фериту	
1	10	90	1	209	186	188,07
2	20	80	2	209	186	190,20
3	30	70	3	209	186	192,40
4	40	60	4	209	186	194,60
5	50	50	5	209	186	196,90
6	60	40	6	209	186	199,599

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

У результаті за допомогою програми Maple 6.0 отримано наступні аналітичні залежності модуля пружності характеристик матеріалу від процентного вмісту перліту:

$$E(x) = 0.1850921558 \times 10^{12} + 437495152.3 \times 10^9 x - 0.2248811689 \times 10^8 x^2 + 1091249.100 x^3 - 27117.87278 x^4 + 332.0377667 x^5. \quad (7)$$

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

$$\frac{dI}{dx} = 0. \quad (8)$$

Якісна залежність зміни інтенсивності зношування від процентного вмісту твердої складової структури (рис. 6) набуває вигляду

$$x = 73,41. \quad (9)$$

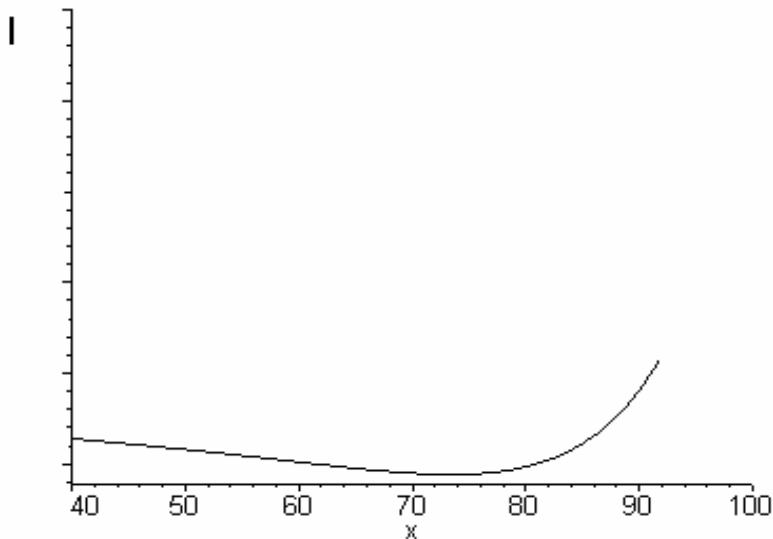


Рис. 6. Залежність лінійної інтенсивності зношування I від процентного вмісту твердої складової структури ферито-перлітної сталі x

При заданому значенні x друга похідна $\frac{d^2I}{dx^2} > 0$, тобто забезпечується мінімум інтенсивності зношування. Отримані розрахункові результати збігаються з проведеними експериментальними дослідженнями, які підтверджують, що при визначеному вмісті твердої складової буде мінімальна інтенсивність зношування.

Таким чином, з використанням уявлень про багаторівневий характер формування механічних властивостей матеріалу контактуючих систем і розробленої імітаційної моделі структури проведено кількісний аналіз впливу перліту від 10 до 60% на модуль пружності ферито-перлітних сталей. Більш точний розрахунок пружних характеристик на основі аналізу механічних властивостей дозволив розробити методику чисельної оцінки лінійної інтенсивності зношування гетерогенного матеріалу з урахуванням його структури.

Проведена оптимізація отриманих залежностей дозволила встановити оптимальний вміст твердої фази на рівні 73, 41%, при якому підвищується зносостійкість ферито-перлітної сталі, що підтверджується результатами експериментальних досліджень. Запропонована методика показала добрі результати прогнозування впливу кількісного співвідношення складових на їх зносостійкість [2].

1. Арзамасов Б.И., Сидорин И.И., Косолапов Г.Ф. и др. Материаловедение М., 1986.
2. Бурак Я., Кузін М., Кузін О. Технологічне підвищення стійкості проти спрацювання підшипників ковзання шляхом оптимізації параметрів структури контактуючих металічних систем // Машинознавство. 2006. №2. С. 38 – 43.
3. Горячева И.Г. Механика фрикционного контактного взаимодействия. М., 2001.
4. Корн Т., Корн Г., Справочник по математике (для науч. работников и инженеров) М., 1977.
5. Кузін М.О. Аналіз впливу параметрів структури матеріалу приповерхневих шарів контактуючих систем на їх зносостійкість // Конференція молодих учених із сучасних проблем механіки і математики (24 – 27 травня 2005 р.). Львів, 2005. С. 112 – 113.
6. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: Підруч., К., 2005.
7. Свойства элементов. Ч. 1: Физические свойства. Справ., 2-е изд. М., 1976.
8. Трение, изнашивание и смазка: Справ.: В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М., 1978.