

Тетяна Даніленко

УРАХУВАННЯ ФОРМИ СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ У СТЕРЕОЛОГІЧНОМУ АНАЛІЗІ

Представлено результати застосування методу стереологічної реконструкції розподілу розмірів структурних складових, який дозволяє враховувати їх геометричну форму. Експериментальним дослідженням доведена вірність вихідних положень методу і способу визначення коефіцієнтів форми на етапі переходу від розподілу довжин хорд $P_i(l)$ до розподілу розмірів плоских перерізів $P_i(d)$ поліедрів.

Представлены результаты применения метода стереологической реконструкции распределения размеров структурных составляющих, который позволяет учитывать их геометрическую форму. Экспериментальным исследованием доказана верность исходных положений метода и способа определения коэффициентов формы на этапе перехода от распределения длин хорд $P_i(l)$ к распределению размеров плоских сечений $P_i(d)$ полиэдров.

The results of the stereological reconstruction method application for definition of the structure component size distribution is presented. Method allows take into account the structure component geometric shape. Experimental research have proved of the method basic assumptions correctness and the way correctness of determining the coefficients of the shape in the transition from chord length distribution $P_i(l)$ to the plane sections size distribution $P_i(d)$ of polyhedral structure.

Ключові слова: стереологічна реконструкція розподілу розмірів, моделювання структур, металева зеренна структура, моделі структурних складових, форма структурних складових

Методи стереології дозволяють реконструювати розподіл розмірів тривимірних структурних складових (3-D структур) непрозорих матеріалів, виходячи з розподілів їх плоских або лінійних перерізів на плоскому перерізі матеріалу, наприклад, на металографічному шліфі. Найвідоміші стереологічні методи розроблені для сферичних структурних складових [1 – 3], якими не є більшість об'єктів дослідження у різних матеріалах (металеві зерна, неметалеві вclusions в металах, складові у бетонах, гранітах, дисперсні частинки в композитних матеріалах тощо).

Описанню форми несферичних структурних складових присвячено чимало робіт [4 – 8], але це питання продовжує лишатися актуальним. У даному дослідженні представлені результати застосування опублікованого в [9 – 15] методу стереологічної реконструкції 3-D структури, в якому можна використовувати два види вихідної інформації – розподіл розмірів плоских або лінійних перерізів 3-D структур і який дозволяє враховувати форму структурних складових.

© Даніленко Т. П., 2013

У даному дослідженні представлені результати застосування опублікованого в [9 – 15] методу стереологічної реконструкції 3-D структури, в якому можна використовувати два види вихідної інформації – розподіл розмірів плоских або лінійних перерізів 3-D структур і який дозволяє враховувати форму структурних складових. Урахування форми здійснюється введенням коефіцієнтів форми α_i і β_i в розрахункові формули методу, які встановлюють взаємозв'язок між розподілами розмірів сфер $P(D_k)$ та їх плоских перерізів (кругів) $P_i(d)$ і хорд $P_i(l)$:

$$P_i(d) = \sum_{k=i}^n \alpha_{k-i+1} P(D_k) \left(\sqrt{D_k^2 - d_{i-1}^2} - \sqrt{D_k^2 - d_i^2} \right), \quad (1)$$

$$P_i(l) = \sum_{k=i}^n \beta_{k-i+1} P_k(d) \left(\sqrt{d_k^2 - l_{i-1}^2} - \sqrt{d_k^2 - l_i^2} \right). \quad (2)$$

Дане дослідження належить до аналізу структурних елементів поліедричної форми, передусім, зерених металевих структур, які складаються з поліедрів різних форм і розмірів. Такі структури на плоскому перерізі (металографічному шліфі) представлені багатокутниками різних форм і розмірів, а результатом перерізу цих багатокутників січними лініями є хорди. Якщо вихідною інформацією є розподіл хорд $P_i(l)$, який легше визначати ніж розподіл розмірів плоских перерізів $P_i(d)$, то згідно з методом [9], спочатку за формулою (2) складають і вирішують відповідну систему рівнянь відносно невідомих $P_i(d)$, а потім, використовуючи знайдені $P_i(d)$, за формулою (1) складають і вирішують систему рівнянь відносно невідомих $P(D)_k$. Тому дуже важливою є правильність визначення $P_i(d)$ на цьому етапі.

Задачею даного експериментального дослідження був доказ правильності способу визначення коефіцієнтів форми на етапі переходу від розподілу довжин хорд $P_i(l)$ до розподілу розмірів плоских перерізів $P_i(d)$ поліедрів і перевірка вихідного положення методу про те, що ймовірність потрапляння плоского перерізу на січну лінію прямо пропорційна розміру плоского перерізу.

Згідно з методом [9 – 15], коефіцієнти форми β_i визначають по кожному i -му розмірному інтервалу із співвідношення відносних часток хорд від багатокутника і кола, яке є плоским перерізом сфери, відповідно до формули:

$$\beta_i = P_i(l)_{\text{багатокутника}} / P_i(l)_{\text{кола}}. \quad (3)$$

У даному дослідженні моделлю плоского перерізу зеренної структури обрана полідисперсна сукупність правильних п'ятикутників, представлених 5-ма розмірними групами. Кожна група п'ятикутників монодисперсна, тобто п'ятикутники однієї групи мали однаковий розмір, який оцінювався довжиною максимальної хорди (l_{max}), яку можна отримати на п'ятикутнику, а саме 9,51; 19,02; 28,53; 38,04; 47,55 мм.

П'ятикутники були створені в комп'ютерній програмі «Компас» у кількості 80 шт., по 16 шт. у кожній групі, тобто в однаковій кількості по групах (рис. 1). Розташування п'ятикутників на рис. було випадковим, а орієнтація кожного наступного в одній розмірній групі відрізнялася від попереднього на $11,25^\circ$, що дозволило мінімізувати випадковість в орієнтації п'ятикутників.

Експеримент полягав в нанесенні січних ліній на представлену сукупність п'ятикутників, вимірюванні довжин отриманих хорд, розподіленні їх за розмірами, тобто визначенні $P_i(l)$, і порівнянні цього експериментально знайденого розподілу із розрахованим за формулою (2).

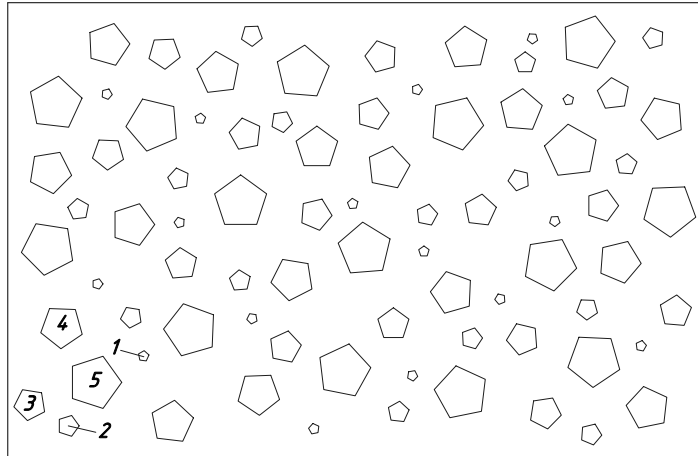


Рис. 1. Сукупність з 80-ти правильних п'ятикутників з l_{max} , яка дорівнює: 1 – 9,51; 2 – 19,02; 3 – 28,53; 4 – 38,04; 5 – 47,55 мм

Попередньо для розрахунку $P_i(l)$ експериментально визначили коефіцієнти форми β_i для правильного п'ятикутника. Для цього відповідно до формули (3) розраховували $P_i(l)_{кола}$, а $P_i(l)_{п'ятикутника}$ визначили експериментально.

Розрахунок $P_i(l)_{кола}$ виконали, виходячи з того, що відносна частка хорд певної розмірної групи $(l_{i-1}...l_i)$ від кола діаметром d_k відповідає відношенню довжин $2AB/d_k$, (рис. 2) [13 – 15], тому розподіл хорд $P_i(l)_{кола}$ від кола діаметром d_k визначили за формулою:

$$P_i(l)_{кола} = \frac{\sqrt{d_k^2 - l_{i-1}^2} - \sqrt{d_k^2 - l_i^2}}{d_k}. \quad (4)$$

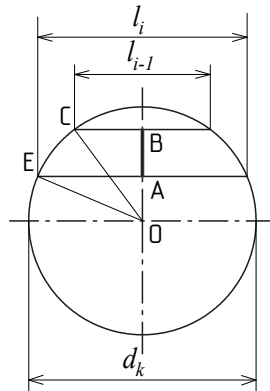


Рис. 2. Схема для визначення відносної частки хорд $P_i(l)_{кола}$ довжиною $(l_{i-1}...l_i)$ від кола діаметром d_k

Оскільки для аналізу обрана структура, яка складалася з п'яти розмірних груп, то приймаючи діаметр кола $d = 1,0$ умовній одиниці (ум. од.), до аналізу застосували рівномірну шкалу з п'ятьма розмірними інтервалами: $(0...0,2)$, $(0,2...0,4)$, $(0,4...0,6)$, $(0,6...0,8)$ і $(0,8...1,0)$ ум. од. (рис. 3). Відносну частку хорд інтервалу $(0,8...1,0)$ ум. од. визначили як відношення двох довжин відрізка OA до діаметра d 1,0 ум. од.; частку хорд інтервалу $(0,6...0,8)$ ум. од. визначили як відношення двох довжин відрізка AB до діаметра d і т.д.

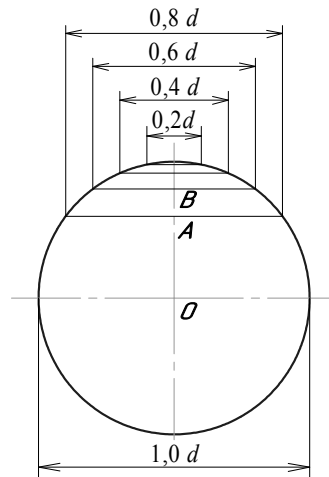


Рис. 3. Схема для визначення часток $P_i(l)_{\text{кола}}$ в п'яти розмірних інтервалах

Відповідно до наведених пояснень, розрахунок $P_i(l)_{\text{кола}}$ виконано за формулою:

$$P_i(l)_{\text{кола}} = \sqrt{1^2 - l_{i-1}^2} - \sqrt{1^2 - l_i^2}.$$

Результати розрахунків подані в табл. 1.

Таблиця 1. Розраховані $P_i(l)_{\text{кола}}$ для розмірної шкали з п'яти інтервалів

$P_i(l)_{\text{кола}}$	$P_1(l)$	$P_2(l)$	$P_3(l)$	$P_4(l)$	$P_5(l)$
Відносні частки	0,02020	0,06328	0,11652	0,2	0,6

Для полідисперсної системи кіл, яка складається з п'яти монодисперсних систем, приймаємо, що кола кожної монодисперсної системи мають розмір, що відповідає значенню верхньої границі розмірного інтервалу (рис. 4). У результаті нанесення січних ліній на групу кіл п'ятого інтервалу такої системи отримуємо перерізи-хорди у всі п'ять інтервалів у відношенні, наведеному в табл. 1.

Кола четвертого інтервалу, тобто діаметром $d = 0,8$ ум. од., дають хорди тільки в чотири інтервали $(0 \dots 0,2)$, $(0,2 \dots 0,4)$, $(0,4 \dots 0,6)$ і $(0,6 \dots 0,8)$ ум. од., а саме: у співвідношенні: 0,03175; 0,10222; 0,20459; 0,66144.

При цьому відносна частка хорд інтервалу $(0,6 \dots 0,8)$ ум. од. визначається відношенням двох довжин відрізка OA до довжини діаметра $d = 0,8$ ум. од. (див. рис. 4 для $d = 0,8$); частка хорд інтервалу $(0,4 \dots 0,6)$ ум. од. визначається відношенням двох довжин відрізка AB до довжини діаметра $d = 0,8$ ум. од. і т.д.

Кола діаметром $d = 0,6$ ум. од., дають хорди тільки в три інтервали $(0 \dots 0,2)$, $(0,2 \dots 0,4)$ і $(0,4 \dots 0,6)$ ум. од., а саме у співвідношенні: 0,05719; 0,19745; 0,74536.

Кола діаметром $d = 0,4$ ум. од., дають хорди в два інтервали $(0 \dots 0,2)$ і $(0,2 \dots 0,4)$ ум. од., а саме у співвідношенні: 0,13397; 0,86603. Кола діаметром $d = 0,2$ ум. од. дають хорди тільки в перший розмірний інтервал $(0 \dots 0,2)$ ум. од.

Експериментальне визначення $P_i(l)_{\text{н'ятикутника}}$ виконали у програмі «Компас» на п'ятикутника, максимальна хорда l_{max} від якого становила 70 мм, що ілюструє рис. 5, а

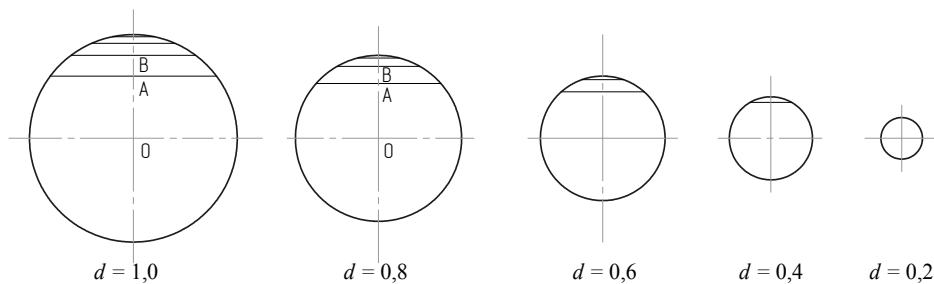


Рис. 4. Схема для визначення відносних часток $P(l)$ від кіл діаметрами d 1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2 ум. од. (горизонтальними лініями позначені границі розмірних інтервалів обраної шкали).

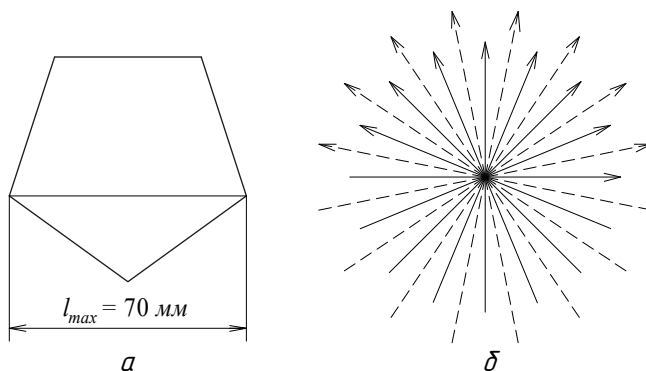


Рис. 5. Правильний п'ятикутник з максимальною хордою $l_{max}=70$ мм (а) і напрямки нанесення на п'ятикутник січних ліній (б)

На цей п'ятикутник відповідно до [16] були нанесені 16 груп паралельних січних ліній, напрямки яких показані на рис. 5, б. Відстань між лініями однієї групи складала 1 мм, а кут між двома сусідніми групами ліній був $11,25^{\circ}$. Хорди, отримані в результаті перетину січних ліній з п'ятикутником, були заміряні і розподілені у рівномірних розмірних шкалах з двох, трьох, чотирьох і п'яти інтервалів, тобто знайдені необхідні для розрахунку коефіцієнтів форми β_i розподіли $P_i(l)_{п'ятикутника}$.

Для підтвердження достатності для експеримента отриманої кількості хорд, їх визначення проведено у два етапи: спочатку для напрямів, показаних на рис. 5, б суцільними лініями (серія I), а потім – показаних пунктирними (серія II) і по двом серіям спільно (I+II). Результати подані у табл. 2.

Таблиця 2. Розподіли хорд від п'ятикутника і кола у п'яти інтервалах і коефіцієнти форми $\beta_{11} \dots \beta_{15}$

Розмірні інтервали, мм	0...14	14...28	28...42	42...56	56...70
Кількість хорд серії I, шт.	53	51	52	166	226
Кількість хорд серії II, шт.	51	53	52	163	229
Кількість хорд двох серій (I+II), шт.	104	104	104	329	455
Відносні частки хорд $P_i(l)_{п'ятикутника}$ (серій I+II), %	9,489	9,489	9,489	30,018	41,515
Розраховані відносні частки хорд від кола $P_i(l)_{кола}$, %	2,020	6,328	11,652	20,0	60,0
Коефіцієнти форми β_i	β_{11}	β_{12}	β_{13}	β_{14}	β_{15}
	4,698	1,500	0,814	1,501	0,692

Близькість отриманих розподілів хорд по серіях січних I і II показала достатність нанесення тільки однієї з серій, що відповідає восьми групам паралельних січних з кутом між двома сусідніми групами січних $22,5^0$.

В *табл. 2* наведені також розраховані відносні частки хорд від кола $P_i(l)_{\text{кола}}$.

Далі, відповідно до пояснення до визначення $P_i(l)_{\text{кола}}$ у п'яти розмірних інтервалах, експериментально знайшли розподіл хорд від правильного п'ятикутника $P_i(l)_{\text{п'ятикутника}}$ і розраховали за формулою (3) коефіцієнти форми β_i таким чином.

П'ятикутники 1-го розмірного інтервалу, як і кола, дають хорди тільки в 1-й розмірній інтервал, тому $\beta_1=1$.

П'ятикутники 2-го розмірного інтервалу дають хорди в 1-й і 2-й інтервали.

Оскільки для аналізу обраний п'ятикутник з $l_{\text{max}}=70$ мм, то перший інтервал включає діапазон хорд (0...35) мм, а другий – (35...70) мм. Усього на п'ятикутнику було виміряно 1096 хорд і з них у 1-й інтервал потрапило 260 хорд, а у другий – 836, що у відсотках склало 23,723 і 76,277 % відповідно. Розраховуємо коефіцієнти форм для цих інтервалів:

$$\beta_2 = \frac{23,723}{13,397} = 1,771; \quad \beta_3 = \frac{76,277}{86,603} = 0,881.$$

П'ятикутники третього інтервалу дають хорди в 1-й, 2-й і 3-й розмірні інтервали. Для п'ятикутника з $l_{\text{max}}=70$ мм перший інтервал включає діапазон хорд (0...23,33) мм, другий – (23,33...46,67) мм, третій – (46,67...70) мм і 1096 хорд розподілилися по цих інтервалах у кількості: 171, 208, 717 шт., що у відсотках склало 15,602; 18,978; 65,420 % відповідно. Розраховуємо коефіцієнти форми для цих інтервалів:

$$\beta_4 = \frac{15,602}{5,719} = 2,728; \quad \beta_5 = \frac{18,978}{19,745} = 0,961; \quad \beta_6 = \frac{65,420}{74,536} = 0,878.$$

П'ятикутники четвертого інтервалу дають хорди в 1-й, 2-й, 3-й і 4-й розмірні інтервали. Для п'ятикутника з $l_{\text{max}}=70$ мм перший інтервал включає діапазон хорд (0...17,5) мм, другий – (17,5...35,0) мм, третій – (35,0...52,5), четвертий – (52,5...70) мм і 1096 хорд розподілилися по цих інтервалах у кількості: 129, 132, 268 і 567 шт., що у відсотках склало 11,770; 12,044; 24,452 і 51,734 % відповідно. Розраховуємо коефіцієнти форми для цих інтервалів:

$$\beta_7 = \frac{11,770}{3,175} = 3,707; \quad \beta_8 = \frac{12,044}{10,222} = 1,178; \quad \beta_9 = \frac{24,452}{20,459} = 1,195; \quad \beta_{10} = \frac{51,734}{66,144} = 0,782.$$

П'ятикутники п'ятого інтервалу дають хорди в п'ять інтервалів, результати розподілу хорд і розраховані коефіцієнти форми β_{11} ; β_{12} ; β_{13} ; β_{14} ; β_{15} наведені в *табл. 1*.

Формули для розрахунку $P_i(l)_{\text{п'ятикутника}}$ в розмірній шкалі з 5-ти інтервалів мають такий загальний вигляд:

$$\begin{aligned} P_5(l) &= \beta_{15} P_5(d) \sqrt{d_5^2 - l_4^2}; \\ P_4(l) &= \beta_{10} P_4(d) \sqrt{d_4^2 - l_3^2} + \beta_{14} P_5(d) (\sqrt{d_5^2 - l_3^2} - \sqrt{d_5^2 - l_4^2}); \\ P_3(l) &= \beta_6 P_3(d) \sqrt{d_3^2 - l_2^2} + \beta_9 P_4(d) (\sqrt{d_4^2 - l_2^2} - \sqrt{d_4^2 - l_3^2}) + \beta_{13} P_5(d) (\sqrt{d_5^2 - l_2^2} - \sqrt{d_5^2 - l_3^2}); \\ P_2(l) &= \beta_3 P_2(d) \sqrt{d_2^2 - l_1^2} + \beta_5 P_3(d) (\sqrt{d_3^2 - l_1^2} - \sqrt{d_3^2 - l_2^2}) + \beta_8 P_4(d) (\sqrt{d_4^2 - l_1^2} - \sqrt{d_4^2 - l_2^2}) + \\ &+ \beta_{12} P_5(d) (\sqrt{d_5^2 - l_1^2} - \sqrt{d_5^2 - l_2^2}); \end{aligned}$$

$$P_i(l) = \beta_1 P_1(d) d_1 + \beta_2 P_2(d) (\sqrt{d_2^2} - \sqrt{d_2^2 - l_1^2}) + \beta_4 P_3(d) (\sqrt{d_3^2} - \sqrt{d_3^2 - l_1^2}) + \beta_7 P_4(d) (\sqrt{d_4^2} - \sqrt{d_4^2 - l_1^2}) + \beta_{11} P_5(d) (\sqrt{d_5^2} - \sqrt{d_5^2 - l_1^2}).$$

Отримані результати мають бути пронормовані [9; 10] за формулою:

$$P'_i(l) = P_i(l) / \sum_{i=1}^n P_i(l). \quad (5)$$

Результати розрахунку за наведеними формулами розподілу $P_i(l)$ і $P'_i(l)$ для полідисперсної структури з п'ятикутників, представленої на *рис. 1*, наведені у *табл. 3*. У *табл. 3* наведені також дані експериментально визначеного розподілу $P_i(l)_{екс}$, який отримали в результаті нанесення на полідисперсну сукупність п'ятикутників (див. *рис. 1*) паралельних січних ліній з відстанню між сусідніми лініями 0,5 мм; вимірювання довжин отриманих хорд у кількості 4477 шт. і розподілення їх за розмірами.

Близькість розподілів експериментального $P_i(l)_{екс}$ і розрахованого $P'_i(l)$ підтвердила вірність способу визначення коефіцієнтів форми на етапі переходу від розподілу довжин хорд $P_i(l)$ до розподілу розмірів плоских перерізів $P_i(d)$ поліедрів (багатокутників). Максимальне відносне відхилення розрахованого $P'_i(l)$ від $P_i(l)_{екс}$ становить тільки 1,08 %. Разом з тим, розрахунок $P'_i(l)_{сф}$ за формулою (2), але без коефіцієнтів форми (тобто з використанням сферичної моделі багатокутника), дав результат, який значно відрізнявся від $P_i(l)_{екс}$, особливо для першого та п'ятого інтервалів (відхилення, відповідно, 42,6 і 44,2 %), що свідчить про некоректність використання сферичної моделі до стереологічного аналізу структурних складових несферичної форми.

Крім того, підтверджене вихідне положення методу про те, що ймовірність потрапляння плоского перерізу на січну лінію прямо пропорційна розміру плоского перерізу, оскільки співвідношення кількості хорд, отриманих на п'ятикутниках п'яти розмірних груп практично співпало із співвідношенням їх l_{max} (або їх площ), а саме, співвідношення l_{max} відповідає: 9,51 : 19,02 : 28,53 : 38,04 : 47,55 = 1 : 2 : 3 : 4 : 5, а співвідношення кількостей хорд, отриманих від кожної з п'яти груп п'ятикутників: 298 : 597 : 895 : 1195 : 1492 = 1 : 2,003 : 3,003 : 4,010 : 5,007.

Знайдені $P_i(l)_{екс}$ і $P'_i(l)$, визначене експериментально, були застосовані як вихідна інформація для реконструкції розподілу розмірів п'ятикутників за системою рівнянь, сформованих за формулою (2), в яких невідомим були $P_k(d)$. Результати реконструкції були про нормовані за формулою:

$$P'_k(d) = P_k(d) / \sum_{i=1}^n P_k(d).$$

Результати наведені в *табл. 4*. Розподіл $P_k(d)$, розрахований з вихідного $P_i(l)_{екс}$, мав незначні відхилення від вихідного рівномірного по інтервалах розподілу п'ятикутників, що свідчить про деяку недостатність кількості заміряних хорд (4477 шт.) і необхідність отримання більш достовірної вихідної інформації по $P'_i(l)$ для стереологічної реконструкції структур.

Розподіл $P_k(d)$, розрахований з вихідного $P'_i(l)$ практично співпав з вихідним рівномірним по інтервалах розподілом п'ятикутників, що підтвердило правильність самого методу реконструкції і способу урахування форми структурних елементів.

Таблиця 3. Результати дослідження полідисперсної системи п'ятикутників

Розмірні інтервали, мм	0...9,51	9,51... 19,02	19,02... 28,53	28,53... 38,04	38,04... 47,55
Частки $P'_i(l)$ розраховані	5,4930	5,8039	6,4961	6,7901	3,9486
Частки $P'_i(l)$ нормовані, %	19,252	20,342	22,768	23,798	13,839
Розподіл хорд (4477 шт.) по розмірних інтервалах, визначений експериментально, шт.	867	901	1024	1064	621
Частки $P_i(l)_{екс}$ визначені експериментально аналізом 4477 хорд, %	19,366	20,125	22,872	23,766	13,871
Абсолютне відхилення розрахованого $P'_i(l)$ від $P_i(l)_{екс}$	0,114	0,217	0,104	0,032	0,032
Відносне відхилення розрахованого $P'_i(l)$ від $P_i(l)_{екс}$, %	0,59	1,08	0,45	0,13	0,23
Частки $P_i(l)_{сф}$ розраховані для сферичної моделі, %	11,117	20,331	24,243	24,309	20,0
Відносне відхилення розрахованого $P_i(l)_{сф}$ від $P_i(l)_{екс}$, %	42,6	1,0	6,0	2,3	44,2

Таблиця 4. Результати реконструкції $P_i(d)$ сукупності п'ятикутників

Розмірні інтервали, мм	0...9,51	9,51... 19,02	19,02... 28,53	28,53... 38,04	38,04... 47,55
Вихідний розподіл $P_k(d)$, %	20	20	20	20	20
Розподіл $P'_i(d)$, розрахований від $P'_i(l)$, %	19,9991	20,0007	20,0005	19,9998	20
Розподіл $P'_i(d)$, розрахований від $P_i(l)_{екс}$, %	20,465	19,482	20,154	19,886	20,013

ЛІТЕРАТУРА

1. С. А. Салтыков. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976.
2. E. Underwood. Quantitative Stereology. Addison-Wesley Publishing Comp., Massachusetts, 1970.
3. J. C. Russ, R. T. Dehoff. Practical Stereology. Springer, 2001.
4. Williams W., Smith C. // Trans. AIME. – 1952. – 194. – P. 755 – 761.
5. Rhines F.N., Patterson B.R. // Metal Trans. – 1982. – 13A. – P. 985 – 993.
6. Takayama Y., Tozawa T. // Proc. Conf. on Science and Engineering of Light Metals. RASELM'91. – Tokyo, Japan. – Oct. 1991. – P. 947 – 952.
7. Steele G.H. // Proc. Second Int. Cong. for Stereology. – New York. – 1967. – P. 74 – 76.
8. Takayama Y., Furushiro N. // Mat. Trans. JIM. – 1991. – 32. – № 3. – P. 214 – 221.
9. Патент на винахід № 97453, Україна. Спосіб визначення основних параметрів об'ємної структури металевих матеріалів / Т. П. Даніленко, Е. І. Даніленко // Бюл. «Промислова власність». – 2012. – № 3.
10. Даніленко Т. П. Оптимизация режимов термической обработки на основе разработки нового метода определения параметров пространственной зеренной структуры: дис. канд. техн. наук / ДМети. – Днепропетровск, 1988. – 227 с.
11. Danilenko T. Proc. 1-st Int. Conf. "Development, Testing and Application of Materials". – Croatia, 1996. – P. 89 – 95.
12. А.с. 1397832 СССР. Способ определения распределения размеров плоских сечений зерна металлографических образцов / Е. Я. Лезинская, Т. П. Даніленко. // Бюл. изобретений. – 1988. – № 19.
13. Даніленко Т. П. Стереологічна реконструкція і математичне моделювання тривимірних структур. // Збірник наукових праць ДЕТУТ. – Серія: Транспортні системи і технології. – К.: ДЕТУТ. – Вип. 16. – 2010. – С. 100-109
14. Даніленко Т. П. Застосування стереології до аналізу металевих зеренних структур. // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 35 – 42.
15. Даніленко Т. П. Визначення параметрів об'ємної зеренної структури металевих матеріалів // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 1. – С. 38 – 47.
16. Способ определения распределения размеров плоских сечений зерна металлографических образцов. – 17. А.С. СССР № 1397832. // Лезинская Е. Я., Даніленко Т. П. – Оpubл., 1988. – Бюл. №19.