



УКРАЇНА

(19) UA (11) 97453 (13) C2
 (51) МПК (2012.01)
 G01N 33/20 (2006.01)
 G01N 21/00

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
 ВЛАСНОСТІ
 УКРАЇНИ

ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄМНОЇ СТРУКТУРИ МЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

1

2

(21) а201101065

(22) 31.01.2011

(24) 10.02.2012

(46) 10.02.2012, Бюл.№ 3, 2012 р.

(72) ДАНИЛЕНКО ТЕТЯНА ПЕТРІВНА, ДАНИЛЕНКО ЕДУАРД ІВАНОВИЧ

(73) ДЕРЖАВНИЙ ЕКОНОМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТУ

(56) UA 77135 C2, 16.10.2006

SU 1397832 A1, 23.05.1988

UA 12657 U, 15.02.2006

SU 377673 A, 17.04.1973

JP 60143769 A, 30.07.1985

JP 03150447 A, 26.06.1991

JP 06264137 A, 20.09.1994

JP 06264137 A, 20.09.1994

(57) 1. Спосіб визначення основних параметрів об'ємної структури металевих матеріалів, який полягає в тому, що виготовляють шліф, отримують видиме зображення зеренної структури металу, вибирають на зображенні структури представницьку її область у сукупності не менш 3-х зерен, які межують одне з одним, наносять на цю область як групу паралельних рівновіддалених січних, так і перпендикулярну до неї другу ідентичну їй групу січних, вимірюють довжини хорд, що утворилися в результаті перерізу січних обох груп межами вибраної сукупності зерен, розподіляють заміряні довжини хорд у відносних частках $P_k(l)$ по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі і по отриманій сукупності вимірів хорд здійснюють реконструкцію розподілу $P_k(d)$ розмірів плоских перерізів зерен, а потім - реконструкцію розподілу $P(D_k)$ розмірів тривимірних об'ємних зерен шляхом вирішення систем лінійних рівнянь і знаходять числові характеристики основних параметрів просторової структури в об'ємі, який **відрізняється** тим, що перед реконструкцією розподілу розмірів плоских перерізів зерен для урахування форми плоских перерізів визначають коефіцієнти їх форми β_k , для чого вибирають мінімальну статистично необхідну кількість типових за формою плоских перерізів, наносять на всю площину кожного з них під рівним кутом одна до другої не менше 8-ми груп

паралельних рівновіддалених січних, вимірюють хорди, що утворилися в результаті перерізу січних межами цих типових плоских перерізів зерен, розподіляють заміряні хорди у відносних частках по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі, знаходять для кожного розмірного інтервалу середні відносні частки хорд $P_k(l)_{cp}$ від цих типових плоских перерізів зерен і визначають коефіцієнти форми β_k для кожного розмірного інтервалу шкали з відношення знайдених середніх відносних часток хорд від плоских перерізів зерен до відповідних розрахованих відносних часток хорд від кола; а реконструкцію розподілу розмірів плоских перерізів зерен здійснюють з урахуванням визначеної пропорційної залежності вірогідності потрапляння плоского перерізу зерна на січну лінію від його розміру шляхом вирішення системи лінійних рівнянь виду:

$$P_k(l) = \beta_1 P_k(d) \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2} + \beta_2 P_{k+1}(d) (\sqrt{d_{k+1}^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_{k+1}^2 - l_k^2}) + \dots + \beta_{n-k+1} P_n(d) (\sqrt{d_n^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_n^2 - l_k^2}),$$

де:

n - кількість розмірних інтервалів у розмірній шкалі;

k - порядковий номер розмірного інтервалу від 1 до n ;

$l_k; l_{k-1}$ - довжини хорд k -го і $(k-1)$ -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$d_k; d_{k+1}; \dots; d_n$ - діаметри кругів, рівновеликих плоским перерізам зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$P_k(l)$ - відносна частка хорд k -го розмірного інтервалу;

$P_k(d); P_{k+1}(d); \dots; P_n(d)$ - відносні частки плоских перерізів зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів;

$\beta_1; \beta_2; \dots; \beta_{n-k+1}$ - коефіцієнти форми плоских перерізів зерен;

після чого отримують нормовані значення $P'_k(d)$ з

$$\text{відношення } P'_k(d) = P_k(d) / \sum_{k=1}^n P_k(d); \text{ потім перед}$$

(13) C2

(11) 97453

(19) UA

реконструкцією розподілу розмірів тривимірних об'ємних зерен для урахування форми зерен визначають коефіцієнти форми α_k , для чого вибирають мінімальну статистично необхідну кількість типових за формою максимальних плоских перерізів зерен, присутніх на зображенні структури, наносять на всю площину кожного з них під рівним кутом одна до другої не менше 8-ми груп паралельних рівновіддалених січних, вимірюють хорди, що утворилися в результаті перерізу січних, межами цих типових максимальних плоских перерізів зерен, розподіляють заміряні хорди у частках по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі, знаходять для кожного розмірного інтервалу середні відносні частки хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$ від цих типових максимальних плоских перерізів зерен і визначають коефіцієнти форми α_k для кожного розмірного інтервалу шкали з відношення знайдених середніх відносних часток хорд до відповідних розрахованих відносних часток діаметрів плоских перерізів (кругів) від сфери; і далі, використовуючи як вихідну інформацію розраховані $P'_k(d)$ або $P_k(d)$, знайдені безпосередніми вимірами діаметрів d_k на зеренній структурі і розподіленням їх у відносних частках по розмірних інтервалах, здійснюють реконструкцію розподілу розмірів тривимірних зерен з урахуванням пропорційної залежності вірогідності потрапляння тривимірного зерна на січну площину від його розміру, шляхом вирішення системи лінійних рівнянь виду:

$$P'_k(d) = \alpha_1 P(D_k) \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2} + \alpha_2 P(D_{k+1}) (\sqrt{D_{k+1}^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_{k+1}^2 - d_k^2}) + \dots + \alpha_{n-k+1} P(D_n) (\sqrt{D_n^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_n^2 - d_k^2}),$$

де:

n - кількість розмірних інтервалів у розмірній шкалі;

k - порядковий номер розмірного інтервалу від 1 до n ;

d_k, d_{k-1} - діаметри кругів, рівновеликих плоским перерізам зерен, відповідно, k -го, $(k-1)$ -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

D_k, D_{k+1}, \dots, D_n - діаметри сфер, рівновеликих тривимірним зернам, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$P_k(d)$ - відносна частка плоских перерізів зерен k -го розмірного інтервалу;

$P(D_k); P(D_{k+1}); \dots; P(D_n)$ - відносні частки тривимірних зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів;

$\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_{n-k+1}$; - коефіцієнти форми тривимірних зерен,

після чого отримують нормовані значення $P'(D_k)$ з

$$\text{відношення } P'(D_k) = P(D_k) / \sum_{k=1}^n P(D_k) \text{ і знаходять}$$

числові характеристики основних параметрів просторової зеренної структури, а також сукупностей плоских і лінійних перерізів зерен.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що для визначення коефіцієнтів форми плоских перерізів зерен β_k для рівномірної розмірної шкали з будь-якою кількістю розмірних інтервалів спочатку знаходять розподіл довжин хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$ від статистично необхідної кількості типових за формою плоских перерізів зерен для рівномірної шкали з не менш як 7-ма розмірними інтервалами, шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як: $l_1/l_{\text{max}}; l_2/l_{\text{max}}; \dots; l_k/l_{\text{max}}; \dots; l_{\text{max}}/l_{\text{max}}$; представляють знайдений розподіл $P_k(l)_{\text{ср}}$ у графічному вигляді; в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних часток довжин хорд від кола $P_k(l)_{\text{кола}}$, які розраховують за формулою

$P_k(l)_{\text{кола}} = \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми β_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою $\beta_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(l)_{\text{кола}}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{\text{ср}}$ і $P_k(l)_{\text{кола}}$ безпосередньо з побудованих графіків; далі аналогічним чином знаходять коефіцієнти форми тривимірних зерен α_k для тієї ж розмірної шкали, для чого спочатку знаходять розподіл довжин хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$ від статистично необхідної кількості типових за формою максимальних плоских перерізів зерен для рівномірної шкали з не менш як 7-ма розмірними інтервалами, шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як: $l_1/l_{\text{max}}; l_2/l_{\text{max}}; \dots; l_k/l_{\text{max}}; \dots; l_{\text{max}}/l_{\text{max}}$; представляють знайдений розподіл $P_k(l)_{\text{ср}}$ у графічному вигляді; в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних часток діаметрів кругів від сфери, які розраховують за формулою

$P_k(d)_{\text{сфери}} = \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми α_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою $\alpha_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(d)_{\text{сфери}}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{\text{ср}}$ і $P_k(d)_{\text{сфери}}$ безпосередньо з побудованих графіків.

3. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що видимим зображенням зеренної структури може бути зображення плоских перерізів будь-яких елементів структури поліедричної, сферичної, еліпсоїдної та подібних їм форм, в тому числі неметалевих включень, графітної і цементитної фаз, вторинних фаз, інтерметалевих фаз та інших, для яких знаходять відповідні коефіцієнти форми їх плоских перерізів β_k і коефіцієнти форми самих тривимірних елементів структури α_k .

Винахід належить до області металографічних досліджень і аналізу зеренної структури металевих матеріалів, способів визначення основних її параметрів.

Формування регламентованої структури будь-якого виробу забезпечується технологічним процесом його виготовлення, наприклад, зеренної структури - способами і параметрами пластичної деформації і термічної обробки, вибір яких здійснюють на підставі аналізу їх впливу на зернову структуру.

Зазвичай металеві зеренні структури являють собою полідисперсні системи, тобто такі, що складаються з зерен різних розмірів. Найважливішою вихідною характеристикою таких полідисперсних систем є розподіл їх розмірів, який дозволяє розраховувати багато інших важливих кількісних параметрів структури: середній, максимальний, модальний розмір зерен, кількість зерен в одиниці об'єму (наприклад, в 1 мм^3), характеристики неоднорідності (розкиданості) розмірів - середньоквадратичне відхилення від середнього розміру, коефіцієнт варіації розподілу розмірів зерен та ін.

Кількісні параметри зеренної структури впливають на властивості металів, тому регулюючи ці параметри можливо формувати необхідні властивості, а для цього необхідні способи якомога достовірнішого визначення параметрів.

Через непрозорість металів для світла їх структуру найчастіше досліджують на металографічному шліфі, де зеренна структура представлена сукупністю багатокутників, якими є плоскі перерізи тривимірних (об'ємних) зерен, що мають форму різноманітних поліедрів (Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - М.: - 1970. - С. 276-286).

Але цей плоский переріз на шліфі є двовимірним зображенням реально існуючої тривимірної структури, саме яка і впливає на властивості. Тому задача формування певної структури, наприклад, з регламентованим середнім розміром зерен, є важливою і актуальною, і для її вирішення необхідно якомога достовірніше визначати параметри саме тривимірної об'ємної зеренної структури.

Відомий спосіб визначення основних параметрів об'ємної структури (Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - М.: 1970. - С. 276-286), згідно з яким виготовляють шліф, отримують видиме зображення сферичних елементів структури на плоскому перерізі, встановлюють плоский переріз найбільшого діаметра, залежно від нього вибирають рівномірну розмірну шкалу з кількістю інтервалів не більше 15-ти; вимірюють діаметри плоских перерізів на всьому зображенні під мікроскопом з окуляр-мікрометром або на фотографії структури; розподіляють їх за розмірами в вибраній шкалі; визначають кількість елементів структури в кожній розмірній групі в частках, розраховують розподілення сферичних елементів структури за спеціальною формулою з використанням таблиці зі складовими формули.

Недоліком даного способу є його обмежене застосування, оскільки він призначений до аналізу виключно елементів сферичної форми. Обмеженням є також використання розмірної шкали з кількістю інтервалів не більше 15-ти. Спосіб характеризується також низькою точністю через похибки складного процесу вимірювань діаметрів плоских перерізів.

Відомий також спосіб визначення основних параметрів об'ємної структури матеріалів (Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - М.: 1970. - С. 286-291), який також призначений для аналізу структурних елементів виключно сферичної форми і який включає ту ж послідовність дій, що й за вище наведеним способом, але заміряні діаметри плоских перерізів сферичних частинок розподіляють в розмірній шкалі з 12-ма інтервалами, побудованій як геометричний ряд з множителем, що дорівнює $10^{-0,1}=0,79433$, а розрахунок розподілу сферичних частинок за розмірами проводять за спеціальною формулою.

Недоліком даного способу є його обмежене застосування, оскільки він призначений до аналізу виключно елементів сферичної форми. Обмеженням є також використання тільки однієї регламентованої нерівномірної розмірної шкали з 12-ма інтервалами. Спосіб характеризується також низькою точністю через похибки складного процесу вимірювань діаметрів плоских перерізів.

Найбільш близьким за змістом є спосіб визначення основних параметрів структури металу (Патент України № 77135. - Опубл. 2006 - Бюл. №10), який полягає в тому, що виготовляють шліф, отримують видиме зображення зеренної структури металу, вибирають на зображенні представницьку область структури у сукупності не менше 3-х зерен, які межують одне з одним, наносять на неї як групу паралельних рівновіддалених січних, так і перпендикулярну до неї другу ідентичну групу січних, вимірюють довжини хорд, що утворилися в результаті перерізу січних обох груп межами вибраної сукупності зерен, розподіляють заміряні довжини хорд по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі і проводять реконструкцію розподілу розмірів плоских перерізів зерен, а потім реконструкцію розподілу тривимірних зерен в об'ємі шляхом вирішення систем лінійних рівнянь; знаходять числові характеристики основних параметрів структури в об'ємі.

Недоліком даного способу є обмежена його придатність тільки для структурних складових сферичної форми, про що свідчить вид його лінійних рівнянь для реконструкції розподілу зерен і їх плоских перерізів. При використанні даного способу для зеренних структур точність реконструкції розподілу розмірів зерен не є достовірною, оскільки:

1) форма зерен, згідно зі способом, приймається не поліедричною, якою вона є реально, а сферичною;

2) відсутнє рішення про врахування поліедричної форми металевих зерен;

3) не враховується існуюча пропорційна залежність вірогідності потрапляння плоских перерізів зерен на січну лінію і тривимірних зерен на січну площину від їх розмірів;

4) у формулі винаходу реконструкція розподілу розмірів плоских перерізів зерен некоректно названа «реконструкцією плоских перерізів», а реконструкція розподілу розмірів тривимірних зерен «реконструкцією об'ємної структури»;

5) не визначено, що є діаметром зерна на плоскому перерізі і що є діаметром зерна в об'ємі, адже об'ємне зерно є поліедром, а його плоский переріз на шліфі - багатокутником.

Тому технологічні можливості застосування цього способу до визначення основних параметрів структури металевих матеріалів при встановленні впливу зеренної структури на властивості матеріалів, при розробці режимів їх термічної обробки, спрямованих на формування регламентованої структури, надто обмежені.

В основу даного винаходу поставлена задача створення способу визначення основних параметрів об'ємної зеренної структури металевих матеріалів, який дозволяє врахувати реальну поліедричну форму металевих зерен і існуючу пропорційну залежність вірогідності потрапляння плоских перерізів зерен на січну лінію і тривимірних зерен на січну площину від їх розмірів шляхом зміни умов обробки видимого зображення структури на шліфі і прийомів по її реконструкції, що підвищує точність знайдених величин основних параметрів структури при одночасному забезпеченні розширення технологічних можливостей способу.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі визначення основних параметрів об'ємної структури металевих матеріалів, який полягає в тому, що виготовляють шліф, отримують видиме зображення зеренної структури металу, вибирають на зображенні структури представницьку її область у сукупності не менш 3-х зерен, які межують одне з одним, наносять на цю область як групу паралельних рівновіддалених січних, так і перпендикулярну до неї другу ідентичну їй групу січних, вимірюють довжини хорд, що утворилися в результаті перерізу січних обох груп межами вибраної сукупності зерен, розподіляють заміряні довжини хорд у відносних частках $P_k(l)$ по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі і по отриманій сукупності вимірів хорд здійснюють спочатку реконструкцію розподілу $P_k(d)$ розмірів плоских перерізів зерен, а потім реконструкцію розподілу $P(D_k)$ розмірів тривимірних об'ємних зерен шляхом вирішення систем лінійних рівнянь і знаходять числові характеристики основних параметрів просторової структури в об'ємі.

При цьому, згідно з винаходом, перед реконструкцією розподілу розмірів плоских перерізів зерен для врахування форми плоских перерізів визначають коефіцієнти їх форми β_k , для чого вибирають мінімальну статистично необхідну кількість типових за формою плоских перерізів, наносять на всю площину кожного з них під рівним кутом одна до другої не менше 8-ми груп

паралельних рівновіддалених січних, вимірюють хорди, що утворилися в результаті перерізу січних межами цих типових плоских перерізів зерен, розподіляють заміряні хорди у відносних частках по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі, знаходять для кожного розмірного інтервалу середні відносні частки хорд $P_k(l)_{cp}$ від цих типових плоских перерізів зерен і визначають коефіцієнти форми β_k для кожного розмірного інтервалу шкали з відношення знайдених середніх відносних часток хорд від плоских перерізів зерен до відповідних розрахованих відносних часток хорд від кола; а реконструкцію розподілу розмірів плоских перерізів зерен здійснюють з урахуванням визначеної пропорційної залежності вірогідності потрапляння плоского перерізу зерна на січну лінію від його розміру шляхом вирішення системи лінійних рівнянь виду:

$$P_k(l) = \beta_1 P_k(d) \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2} + \beta_2 P_{k+1}(d) (\sqrt{d_{k+1}^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_{k+1}^2 - l_k^2}) + \dots + \beta_{n-k+1} P_n(d) (\sqrt{d_n^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_n^2 - l_k^2}),$$

(1)

де:

n - кількість розмірних інтервалів у розмірній шкалі;

k - порядковий номер розмірного інтервалу від 1 до n ;

$l_k; l_{k-1}$ - довжини хорд k -го і $(k-1)$ -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$d_k; d_{k+1}; \dots; d_n$ - діаметри кругів, рівновеликих плоским перерізам зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$P_k(l)$ - відносна частка хорд k -го розмірного інтервалу;

$P_k(d); P_{k+1}(d); \dots; P_n(d)$ - відносні частки плоских перерізів зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів;

$\beta_1; \beta_2; \dots; \beta_{n-k+1}$; - коефіцієнти форми плоских перерізів зерен;

після чого отримують нормовані значення

$$P'_k(d) \text{ з відношення } P'_k(d) = P_k(d) / \sum_{k=1}^n P_k(d).$$

Потім перед реконструкцією розподілу розмірів тривимірних об'ємних зерен для врахування форми зерен визначають коефіцієнти форми α_k , для чого вибирають мінімальну статистично необхідну кількість типових за формою максимальних плоских перерізів зерен, присутніх на зображенні структури, наносять на всю площину кожного з них під рівним кутом одна до другої не менше 8-ми груп паралельних рівновіддалених січних, вимірюють хорди, що утворилися в результаті перерізу січних межами цих типових максимальних плоских перерізів зерен, розподіляють заміряні хорди у частках по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі, знаходять для кожного розмірного інтервалу середні відносні частки хорд $P_k(l)_{cp}$ від цих типових максимальних плоских перерізів зерен і визначають коефіцієнти форми α_k для кожного

розмірного інтервалу шкали з відношення знайдених середніх відносних часток хорд до відповідних розрахованих відносних часток діаметрів плоских перерізів (кругів) від сфери.

Далі, використовуючи як вихідну інформацію розраховані $P'_k(d)$, або $P_k(d)$, знайдені безпосередніми вимірами діаметрів d_k на зеренній структурі і розподіленням їх у відносних частках по розмірних інтервалах, здійснюють реконструкцію розподілу розмірів тривимірних зерен з урахуванням пропорційної залежності вірогідності потрапляння тривимірного зерна на січну площину від його розміру шляхом вирішення системи лінійних рівнянь виду:

$$P'_k(d) = \alpha_1 P(D_k) \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2} + \alpha_2 P(D_{k+1}) (\sqrt{D_{k+1}^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_{k+1}^2 - d_k^2}) + \dots + \alpha_{n-k+1} P(D_n) (\sqrt{D_n^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_n^2 - d_k^2}),$$

(2)

де:

n - кількість розмірних інтервалів у розмірній шкалі;

k - порядковий номер розмірного інтервалу від 1 до n ;

d_k, d_{k-1} - діаметри кругів, рівновеликих плоским перерізам зерен, відповідно, k -го, $(k-1)$ -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

D_k, D_{k+1}, \dots, D_n - діаметри сфер, рівновеликих тривимірним зернам, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$P'_k(d)$ - відносна частка плоских перерізів зерен k -го розмірного інтервалу;

$P(D_k); P(D_{k+1}); \dots; P(D_n)$ - відносні частки тривимірних зерен, відповідно, k -го $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів;

$\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_{n-k+1}$; - коефіцієнти форми тривимірних зерен,

після чого отримують нормовані значення

$P'(D_k)$ з відношення $P'(D_k) = P_k(D) / \sum_{k=1}^n P(D_k)$ і зна-

ходять числові характеристики основних параметрів просторової зеренної структури, а також сукупностей плоских і лінійних перерізів зерен.

Числовими характеристиками основних параметрів структури можуть бути:

розподіл розмірів тривимірних зерен $P(D_k)$, їх плоских $P_k(d)$ і лінійних $P_k(l)$ перерізів (хорд);

середній, максимальний, модальний розмір сукупності зерен, їх плоских і лінійних перерізів;

кількість зерен в одиниці об'єму, їх плоских перерізів на одиниці площини, їх лінійних перерізів на одиниці довжини;

середньоквадратичне відхилення від середнього розміру тривимірних зерен, їх плоских і лінійних перерізів;

коефіцієнт варіації розподілу зерен, їх плоских і лінійних перерізів та ін.

Окрім того, в разі необхідності аналізу структури із застосуванням декількох шкал з різною кількістю розмірних інтервалів, для визначення коефіцієнтів форми плоских перерізів зерен β_k спочатку знаходять розподіл довжин хорд $P_k(l)_{cp}$ від статистично необхідної кількості типових за формою плоских перерізів зерен для рівномірної шкали з не менш як 7-ма розмірними інтервалами, шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як:

$l_1/l_{max}; l_2/l_{max}; \dots; l_k/l_{max}; \dots; l_{max}/l_{max}$; представляють знайдений розподіл $P_k(l)_{cp}$ у графічному вигляді;

в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних довжин хорд від кола $P_k(l)_{кола}$, які розраховують за формулою

$P(l)_{кола} = \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми β_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою

$\beta_k = P_k(l)_{cp} / P_k(l)_{кола}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{cp}$ і $P_k(l)_{кола}$ безпосередньо з побудованих графіків;

далі аналогічним чином знаходять коефіцієнти форми тривимірних зерен α_k для тієї ж розмірної шкали, для чого спочатку знаходять розподіл довжин хорд $P_k(l)_{cp}$ від статистично необхідної кількості типових за формою максимальних плоских перерізів зерен для рівномірної шкали з не менш як 7-ма розмірними інтервалами, шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як:

$l_1/l_{max}; l_2/l_{max}; \dots; l_k/l_{max}; \dots; l_{max}/l_{max}$; представляють знайдений розподіл $P_k(l)_{cp}$ у графічному вигляді;

в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних часток діаметрів кругів від сфери, які розраховують за формулою

$P_k(d)_{сфери} = \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми α_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою

$\alpha_k = P_k(l)_{cp} / P_k(d)_{сфери}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{cp}$ і $P_k(d)_{сфери}$ безпосередньо з побудованих графіків.

Пропонований спосіб може бути застосований і до визначення основних параметрів інших елементів структури полієдричної, сферичної, еліпсоїдної та подібних їм форм, в тому числі неметалевих включень, графітної і цементитної фаз, вторинних фаз, інтерметалевих фаз та ін., в цьому випадку видимим зображенням є зображення плоских перерізів цих елементів структури на шліфі.

Для цих елементів структури теж визначають коефіцієнти форми β_k і α_k аналогічним пропонованому для зеренних структур способом.

Технічним результатом пропонованого способу в порівнянні з найближчим з аналогів є підвищення точності знайдених величин основних параметрів структури при одночасному забезпеченні розширення технологічних можливостей способу.

Це обумовлено тим, що застосування коефіцієнтів форми α_k і β_k і спосіб їх знаходження, який заявляється, дозволяють реконструювати розподіл плоских перерізів зерен, а потім - розподіл тривимірних зерен саме поліедричної форми за формулами, які заявляються, що забезпечує широкі технологічні можливості способу, на відміну від прототипу, який хоча і запропонований для зерених структур, однак не враховує реальну поліедричну форму зерен, а розглядає її як сферичну, і тому дає помилкові результати.

Спосіб визначення коефіцієнтів форми β_k і α_k , який заявляється, в якому використовуються графічні зображення розподілень, відповідно, довжин хорд від плоских перерізів зерен $P_k(l)_{cp}$ і від кола $P_k(l)_{кола}$, і довжин хорд від максимальних плоских перерізів зерен $P_k(l)_{cp}$ і діаметрів кругів від сфери $P_k(d)_{сфери}$, побудованих у спільних осях координат для рівномірної шкали з не менш як 7-ма розмірними інтервалами, спрощує у наступному процесі знаходження коефіцієнтів форми для будь-якої іншої рівномірної шкали з будь-якою кількістю розмірних інтервалів. Це значно розширює технологічні можливості способу. Вибір шкали з кількістю розмірних інтервалів не менше 7-ми обумовлений загально прийнятою металографічною

практикою (Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. -М.: 1970. - С. 265).

Пропонований спосіб враховує також визначену існуючу пропорційну залежність вірогідності потрапляння плоских перерізів зерен на січну лінію і тривимірних зерен на січну площину від їх розміру, в той час як у прототипі це для полідисперсних систем не враховується, оскільки склад формул обох реконструкцій за прототипом описує стан, коли всі зерна сферичної форми різного розміру мають однакову вірогідність потрапити на січну площину, а їх плоскі перерізи, кола, також мають однакову вірогідність потрапити на січну лінію, що не відповідає реальності.

Для доказу останнього ствердження був проведений експеримент, згідно з яким, на сукупність кругів розмірами 50, 30 і 20 мм, взятих у рівній кількості і представлених на фігурі 1, нанесли рівновіддалені січні лінії згідно з пропонованим способом, і визначили кількість хорд, отриманих від кожної розмірної групи кругів. Результати експерименту наведені у таблиці 1 і вони свідчать про прямо пропорційну залежність потрапляння кругів на січну лінію від їх діаметра, тому кожен доданок формул переходу від розподілу розмірів хорд до розподілу розмірів плоских перерізів способом прототипу був помножений на відповідне d_k , як міру цієї вірогідності, в результаті чого d_k у чисельнику і знаменнику скоротилися і формули набули виду (7) пропонованого способу.

Таблиця 1

Діаметр кругів d_k , мм	Відносна частка кругів $P(d_k)$	Співвідношення діаметрів кругів	Кількість хорд, отриманих від кожної групи кругів, шт	Відносна частка хорд від кожної групи кругів
50	0,3333	0,5	924	0,5
30	0,3333	0,3	555	0,3
20	0,3333	0,2	368	0,2

Доказ прямо пропорційної залежності потрапляння сфер на січну площину від їх діаметра був набутий в результаті експерименту, аналогічного попередньому. В цьому випадку круги на Фіг. 7 приймали за сукупності сфер, а січні лінії - за січні площини, перпендикулярні до площини з кругами. І відповідно до цієї залежності кожен доданок формул переходу від розподілу розмірів плоских перерізів зерен до розподілу розмірів тривимірних зерен способом-прототипу був помножений на відповідне D_k , як міру цієї вірогідності, в результаті чого D_k у чисельнику і знаменнику скоротилися і формули набули виду (2) пропонованого способу.

Для зерен-поліедрів і їх плоских перерізів-багатокутників висновок про прямо пропорційну залежність їх потрапляння, відповідно, на січну площину і січну лінію від їх розмірів аналогічний наведеному вище, що ілюструє фігура 4, де видно, що чим більший розмір плоского перерізу зерна, тим більше хорд його перетинають.

Окрім того у пропонованому способі надані чіткі визначення застосованих у формулах реконструкції складових, а саме, що d - це діаметри кругів, рівновеликих плоским перерізам елементів структури, а D - діаметри сфер, рівновеликих тривимір-

ним елементам структури, в той час як у способі прототипу роз'яснення цих понять відсутні.

Указане навело до двох систем лінійних рівнянь виду (7) і (2), які дозволяють реконструювати як розподіл розмірів плоских перерізів зерен, так і розподіл розмірів самих тривимірних зерен саме поліедричної форми, і на підставі вказаних розподілень - до визначення основних параметрів тривимірної структури і її плоских і лінійних перерізів, підвищивши тим самим точність способу і розширивши його технологічні можливості.

На фігурі 7 представлена сукупність кругів розмірами 50, 30 і 20 мм, взятих у рівній кількості, зі схемою нанесення січних ліній.

На фігурі 2 наведено приклад характерних форм плоских перерізів аустенітних зерен різного розміру (по центру кожного фото), на яких встановлювали коефіцієнти форми β_k .

На фігурі 3 наведені напрямки (1-8) нанесення на плоский переріз аустенітного зерна 8-ми груп паралельних рівновіддалених січних і приклад нанесення січних напрямку 3 на зерно для визначення коефіцієнтів форми β_k .

На фігурі 4 зображено фото призначеної до аналізу представницької області зернистої структури однофазної сталі аустенітного класу з фрагментом нанесених січних ліній.

На фігурі 5 наведено приклад характерних форм максимальних плоских перерізів зерен (по центру кожного фото), на яких встановлювали коефіцієнти форми α_k .

На фігурі 6 представлено встановлений вихідний розподіл довжин хорд $P_k(l)$ (Δ – Δ) і реконструйовані за пропонованим способом розподіли діаметрів плоских перерізів зерен $P'_k(d)$ (\circ – \circ) і діаметрів тривимірних зерен $P'(D_k)$ (\boxtimes – \boxtimes) для структури, зображеної на фігурі 4.

На фігурі 7 представлено графіки експериментально встановленого для шкали з 10-ма інтервалами розподілу середніх відносних часток хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$ від 20-ти типових за формою плоских перерізів зерен аустеніту (\boxtimes – \boxtimes) (їх приклади наведені на Фіг. 2) і розрахованого розподілу відносних часток хорд від кола $P_k(l)_{\text{кола}}$ (\circ – \circ), використовуючи які слід знаходити коефіцієнти форми β_k для розмірної шкали з будь-якою кількістю розмірних інтервалів.

Пропонований спосіб здійснюють таким чином.

Зразки шліфують, полірують і піддають травленню для виявлення зеренної структури, а саме, плоских перерізів тривимірних зерен. Видиме зображення плоских перерізів зерен на шліфі фотографують або досліджують за допомогою мікроскопа або аналізаторів структури.

Обробку отриманого видимого зображення плоских перерізів зерен і реконструкцію структури здійснюють, наприклад, за допомогою комп'ютера, на екран дисплея якого виводять зображення зеренної структури, і спочатку для урахування форми плоских перерізів зерен визначають коефіцієнти їх форми β_k , для чого вибирають мінімальну статистично необхідну кількість типових за формою плоских перерізів, наносять на всю площину кожного з них під рівним кутом одна до другої не менше 8-ми груп паралельних рівновіддалених січних, вимірюють довжини хорд l , що утворилися в результаті перерізу січних межами цих типових плоских перерізів зерен, розподіляють заміряні хорди у відносних частках $P_k(l)$ по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі, знаходять для кожного розмірного інтервалу середні відносні частки хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$ від цих типових плоских перерізів зерен і визначають коефіцієнти форми β_k для кожного розмірного інтервалу шкали з відношення знайдених середніх відносних часток хорд плоских перерізів зерен до відповідних розрахованих відносних часток хорд від кола; тобто

$$\beta_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(l)_{\text{кола}}, \text{ де } P(l)_{\text{кола}} = \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2}.$$

Далі вибирають на зображенні структури представницьку її область у сукупності не менш 3-х зерен, які межують одне з одним, наносять на цю область як групу паралельних рівновіддалених січних, так і перпендикулярну до неї другу ідентичну їй групу січних, вимірюють довжини хорд, що

утворилися в результаті перерізу січних обох груп межами вибраної сукупності зерен, розподіляють заміряні довжини хорд у відносних частках $P_k(l)$ по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі і потім по отриманій сукупності вимірів хорд здійснюють реконструкцію розподілу $P_k(d)$ розмірів плоских перерізів зерен з урахуванням визначеної пропорційної залежності вірогідності потрапляння плоского перерізу зерна на січну лінію від його розміру шляхом вирішення систем лінійних рівнянь виду:

$$P_k(l) = \beta_1 P_k(d) \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2} + \beta_2 P_{k+1}(d) (\sqrt{d_{k+1}^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_{k+1}^2 - l_k^2}) + \dots + \beta_{n-k+1} P_n(d) (\sqrt{d_n^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{d_n^2 - l_k^2}),$$

де:

n - кількість розмірних інтервалів у розмірній шкалі;

k - порядковий номер розмірного інтервалу від 1 до n ;

l_k, l_{k-1} - довжини хорд k -го і $(k-1)$ -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

d_k, d_{k+1}, \dots, d_n - діаметри кругів, рівновеликих плоским перерізам зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$P_k(l)$ - відносна частка хорд k -го розмірного інтервалу;

$P_k(d); P_{k+1}(d); \dots; P_n(d)$ - відносні частки плоских перерізів зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів;

$\beta_1; \beta_2; \dots; \beta_{n-k+1}$ - коефіцієнти форми плоских перерізів зерен;

після чого отримують нормовані значення

$$P'_k(d) \text{ з відношення } P'_k(d) = P_k(d) / \sum_{k=1}^n P_k(d).$$

Далі для урахування форми тривимірних зерен визначають коефіцієнти їх форми α_k , для чого вибирають мінімальну статистично необхідну кількість типових за формою максимальних плоских перерізів зерен, присутніх на зображенні структури, наносять на всю площину кожного з них під рівним кутом одна до другої не менше 8-ми груп паралельних рівновіддалених січних, вимірюють довжини хорд l , що утворилися в результаті перерізу січних межами цих типових максимальних плоских перерізів зерен, розподіляють заміряні хорди у відносних частках $P_k(l)$ по розмірних інтервалах у заданій розмірній шкалі, знаходять для кожного розмірного інтервалу середні відносні частки хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$ від цих максимальних типових плоских перерізів зерен і визначають коефіцієнти форми α_k для кожного розмірного інтервалу шкали з відношення знайдених середніх відносних часток хорд від цих максимальних плоских перерізів зерен до відповідних розрахованих відносних часток діаметрів плоских перерізів від сфери, тоб-

то $\alpha_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(d)_{\text{сфери}}$, де

$$P_k(d)_{\text{сфери}} = \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2}.$$

Потім, використовуючи знайдені $P'_k(d)$ як вихідну інформацію, здійснюють реконструкцію розподілу розмірів тривимірних зерен з урахуванням пропорційної залежності вірогідності потрапляння тривимірного зерна на січну площину від його розміру шляхом вирішення системи лінійних рівнянь виду:

$$\begin{aligned} P'_k(d) = & \alpha_1 P(D_k) \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2} + \\ & + \alpha_2 P(D_{k+1}) (\sqrt{D_{k+1}^2 - d_{k-1}^2} - \\ & - \sqrt{D_{k+1}^2 - d_k^2}) + \dots + \alpha_{n-k+1} P(D_n) (\sqrt{D_n^2 - d_{k-1}^2} - \\ & - \sqrt{D_n^2 - d_k^2}), \end{aligned}$$

де:

n - кількість розмірних інтервалів у розмірній шкалі;

k - порядковий номер розмірного інтервалу від 1 до n ;

$d_k; d_{k-1}$ - діаметри кругів, рівновеликих плоским перерізам зерен, відповідно, k -го, $(k-1)$ -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$D_k; D_{k+1}; \dots; D_n$ - діаметри сфер, рівновеликих тривимірним зернам, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів; одиниці довжини;

$P_k(d)$ - відносна частка плоских перерізів зерен k -го розмірного інтервалу;

$P(D_k); P(D_{k+1}); \dots; P(D_n)$ - відносні частки тривимірних зерен, відповідно, k -го, $(k+1)$ -го, ..., n -го розмірних інтервалів;

$\alpha_1; \alpha_2; \dots; \alpha_{n-k+1}$ - коефіцієнти форми тривимірних зерен,

після чого отримують нормовані значення

$$P'(D_k) \text{ з відношення } P'(D_k) = P_k(D) / \sum_{k=1}^n P(D_k) \text{ і зна-}$$

ходять числові характеристики основних параметрів просторової зеренної структури, а також сукупностей плоских і лінійних перерізів зерен.

Як вихідну інформацію для реконструкції розподілення $P(D_k)$ може застосовуватися також розподілення $P_k(d)$, встановлене безпосередніми вимірами діаметрів d_k на структурі і розподіленням їх у відносних частках по розмірних інтервалах.

В разі необхідності аналізу структури із застосуванням декількох шкал з різною кількістю розмірних інтервалів, для визначення коефіцієнтів форми плоских перерізів зерен β_k спочатку знаходять розподіл довжин хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$ від статистично необхідної кількості типових за формою плоских перерізів зерен для рівномірної шкали з не менш як 7-ма розмірними інтервалами і представляють цей розподіл у графічному вигляді, шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як: $l_1/l_{\text{max}}; l_2/l_{\text{max}}; \dots; l_k/l_{\text{max}}; \dots; l_{\text{max}}/l_{\text{max}}$; в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних довжин хорд від кола $P_k(l)_{\text{кола}}$, які розра-

ховують за формулою $P(l)_{\text{кола}} = \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми плоских перерізів зерен β_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою $\beta_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(l)_{\text{кола}}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{\text{ср}}$ і $P_k(l)_{\text{кола}}$ безпосередньо з побудованих графіків. Далі аналогічним чином знаходять коефіцієнти форми тривимірних зерен α_k , для чого розподіл довжин хорд $P_k(l)_{\text{ср}}$, отриманих від статистично необхідної кількості типових за формою максимальних плоских перерізів зерен для рівномірної шкали з 7-ма розмірними інтервалами, представляють у графічному вигляді, шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як: $l_1/l_{\text{max}}; l_2/l_{\text{max}}; \dots; l_k/l_{\text{max}}; \dots; l_{\text{max}}/l_{\text{max}}$; в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних часток діаметрів кругів від сфери, які розраховують за формулою

$P_k(d)_{\text{сфери}} = \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми α_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою $\alpha_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(d)_{\text{сфери}}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{\text{ср}}$ і $P_k(d)_{\text{сфери}}$ безпосередньо з побудованих графіків.

Пропонований спосіб може бути застосований і до визначення основних параметрів інших елементів структури полієдричної, сферичної, еліпсоїдної та подібних їм форм, в тому числі неметалевих включень, графітної і цементитної фаз, вторинних фаз, інтерметалевих фаз та ін., в цьому випадку видимим зображенням є зображення плоских перерізів цих елементів структури на шліфі. Для цих елементів структури теж визначають коефіцієнти форми β_k і α_k пропонованим для зеренних структур способом.

Як приклад пропонований спосіб був застосований до аналізу зеренної структури наступним чином.

Для аналізу зеренної структури за пропонованим способом з труби розмірами $\varnothing 6,9 \times 0,4$ мм (сталь 026X16H15M3Б) виготовили металографічний шліф, який для виявлення зеренної мікроструктури протруїли в азотній кислоті і за допомогою металографічного мікроскопа MIM-7 отримали зображення плоского перерізу зеренної структури (плоских перерізів зерен).

Потім для визначення коефіцієнтів форми β_k візуально проаналізували під мікроскопом форму плоских перерізів зерен, вибрали мінімальну статистично необхідну кількість типових форм різного розміру у 20 шт., сфотографували їх (Фіг. 2) і на кожне зображення нанесли під кутом $22,5^\circ$ одна до другої 8 груп паралельних січних (Фіг. 3), заміряли довжини отриманих хорд; для кожного плоского зерна встановили максимальну хорду l_{max} і розміри усіх хорд від цього плоского зерна представили у відносному вигляді l/l_{max} , а потім розподілили їх у частках в рівномірній розмірній шкалі з 10-ма інтервалами; далі знайшли середні частки хорд

$P_k(l)_{\text{ср}}$ по кожному розмірному інтервалу для 20-ти типових форм плоских зерен і визначили коефіцієнти форми плоских перерізів зерен β_k для кожного розмірного інтервалу з відношення знайдених $P_k(l)_{\text{ср}}$ до відповідних розрахованих відносних

часток хорд від кола: $\beta_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(l)_{\text{кола}}$, де

$P(l)_{\text{кола}} = \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2}$. Коефіцієнти форми β_k наведені у таблиці 2.

Таблиця 2

β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
0,188	1,063	1,669	1,904	1,664	1,607	1,710	2,036	3,259	6,563

Потім, вибравши представницьку область зеренної структури (Фіг. 4), ввели це зображення в комп'ютер, нанесли на зображення дві групи паралельних рівновіддалених один від одного січних у двох взаємно перпендикулярних напрямках, заміряли довжини всіх отриманих хорд і

розрахували розподіл їх по розмірних групах у рівномірній шкалі з 10-ма розмірними інтервалами з кроком 15,6 мкм, виходячи з того, що максимальна хорда становила 156 мкм. Результати отриманих вимірів наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

№№ інтервалів k	Межі інтервалів $l_{\min} - l_{\max}$, МКМ	Кількість хорд по інтервалах, шт.	Відносні частки хорд, $P_k(l)$
1	0-15,6	656	0,1128117
2	15,6-31,2	1444	0,2483233
3	31,2-46,8	1494	0,2569218
4	46,8 - 62,4	1084	0,1864145
5	62,4 - 78,0	616	0,1059329
6	78,0-93,6	300	0,0515907
7	93,6-109,2	136	0,0233878
8	109,2-124,8	60	0,0103181
9	124,8-140,4	21	0,0036113
0	140,4-156,0	4	0,0006879

Для знаходження розподілу діаметрів плоских перерізів зерен $P_k(d)$ склали наступну систему рівнянь виду (7):

$$\begin{aligned}
 0,0006879 &= 0,188P_{10}(d) \sqrt{156^2 - 140,4^2}; \\
 0,0036113 &= 0,188P_9(d) \sqrt{140,4^2 - 124,8^2} + 1,063P_{10}(d) (\sqrt{156^2 - 124,8^2} - \sqrt{156^2 - 140,4^2}); \\
 0,0103181 &= 0,188P_8(d) \sqrt{124,8^2 - 109,2^2} + 1,063P_9(d) (\sqrt{140,4^2 - 109,2^2} - \\
 &\sqrt{140,4^2 - 124,8^2}) + 1,669P_{10}(d) (\sqrt{156^2 - 109,2^2} - \sqrt{156^2 - 124,8^2}); \\
 0,0233878 &= 0,188P_7(d) \sqrt{109,2^2 - 93,6^2} + 1,063P_8(d) (\sqrt{124,8^2 - 93,6^2} - \sqrt{124,8^2 - 109,2^2}) + 1,669 \\
 &P_9(d) (\sqrt{140,4^2 - 93,6^2} - \sqrt{140,4^2 - 109,2^2}) + 1,904P_{10}(d) (\sqrt{156^2 - 93,6^2} - \sqrt{156^2 - 109,2^2}); \\
 0,0515907 &= 0,188P_6(d) \sqrt{93,6^2 - 78^2} + 1,063P_7(d) (\sqrt{109,2^2 - 78^2} - \\
 &\sqrt{109,2^2 - 93,6^2}) + \dots + 1,664P_{10}(d) (\sqrt{156^2 - 78^2} - \sqrt{156^2 - 93,6^2}); \\
 0,1059329 &= 0,188P_5(d) \sqrt{78^2 - 62,4^2} + 1,063P_6(d) (\sqrt{93,6^2 - 62,4^2} - \\
 &\sqrt{93,6^2 - 78^2}) + \dots + 1,607P_{10}(d) (\sqrt{156^2 - 62,4^2} - \sqrt{156^2 - 78^2}); \\
 0,1864145 &= 0,188P_4(d) \sqrt{62,4^2 - 46,8^2} + 1,063P_5(d) (\sqrt{78^2 - 46,8^2} - \sqrt{78^2 - 62,4^2}) + \dots + 1,710P_{10}(d) \\
 &(\sqrt{156^2 - 46,8^2} - \sqrt{156^2 - 62,4^2}); \\
 0,2569218 &= 0,188P_3(d) \sqrt{46,8^2 - 31,2^2} + 1,063P_4(d) (\sqrt{62,4^2 - 31,2^2} - \\
 &\sqrt{62,4^2 - 46,8^2}) + \dots + 2,036P_{10}(d) (\sqrt{156^2 - 31,2^2} - \sqrt{156^2 - 46,8^2});
 \end{aligned}$$

$$0,2483233=0,188P_2(d)\sqrt{31,2^2-15,6^2}+1,063P_3(d)(\sqrt{46,8^2-15,6^2}-\sqrt{46,8^2-31,2^2}+\dots+3,259P_{10}(d)(\sqrt{156^2-15,6^2}-\sqrt{156^2-31,2^2});$$

$$0,1128117=0,188P_1(d)\sqrt{15,6^2-0}+1,063P_2(d)(\sqrt{31,2^2-0}-\sqrt{31,2^2-15,6^2})+\dots+6,563P_{10}(d)(\sqrt{156^2-0}-\sqrt{156^2-15,6^2}).$$

Вирішили наведену систему рівнянь, наприклад, за допомогою комп'ютера, в результаті чого знайшли всі значення $P_k(d)$, після чого отримали нормовані значення $P'_k(d)$ із співвідношення

$$P'(d_k)=P_k(d)/\sum_{k=1}^n P_k(d), \text{ які у сукупності являють}$$

собою розподіл діаметрів плоских перерізів зерен і який є вихідним для наступної реконструкції розподілу діаметрів зерен в об'ємі.

Отримані результати реконструкції наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

№№ інтервалів k	Межі інтервалів $l_{\min}-l_{\max}$, МКМ	Розраховані відносні частки $P_k(d)$	Розподіл діаметрів плоских перерізів зерен (нормовані відносні частки) $P'_k(d)$
1	0-15,6	0,0015308	0,0501813
2	15,6-31,2	0,0058669	0,1923221
3	31,2-46,8	0,0082069	0,2690290
4	46,8 - 62,4	0,0071468	0,2342776
5	62,4-78,0	0,0042715	0,1400243
6	78,0-93,6	0,0020821	0,0682534
7	93,6-109,2	0,0007992	0,0261979
8	109,2-124,8	0,0003700	0,0121302
9	124,8-140,4	0,0001776	0,0058203
10	140,4-156,0	0,0000538	0,0017639

Потім визначили коефіцієнти форми α_k для реконструкції розподілу діаметрів тривимірних зерен. Для цього візуально проаналізували під мікроскопом форму максимальних плоских перерізів зерен, вибрали мінімальну статистично необхідну кількість типових форм у 20 шт, сфотографували їх і на кожне зображення нанесли під кутом 22,5 одна до другої 8 груп паралельних січних, заміряли довжини отриманих хорд; для кожного плоского зерна встановили максимальну хорду l_{\max} і розміри усіх хорд від цього плоского зерна представили у відносному вигляді l/l_{\max} , потім розподілили їх у відносних частках в рівномірній розмірній шкалі з 10-ма інтервалами. Знайдені частки хорд $P_k(i)$, згідно з винаходом (А.с. СССР № 1397832. - Опубл. 1988 - Бюл. №

19), приймали за відносні частки розмірів плоских перерізів $P_k(d)$ від тих тривимірних зерен, на максимальні плоскі перерізи яких були нанесені січні лінії. Після цього знайшли середні частки $P_k(d)_{\text{ср}}$ по кожному розмірному інтервалу для 20-ти проаналізованих типових форм плоских зерен і визначили коефіцієнти форми α_k для кожного розмірного інтервалу з відношення знайдених $P_k(d)_{\text{ср}}$ до відповідних розрахованих відносних часток діаметрів кругів від сфери:

$$\alpha_k = P_k(l)_{\text{ср}} / P_k(d)_{\text{сфери}}, \quad \text{де}$$

$P_k(d)_{\text{сфери}} = \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2}$. Коефіцієнти форми α_k наведені у таблиці 5.

Таблиця 5

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9	α_{10}
0,218	1,186	1,657	1,807	1,595	1,478	1,520	1,773	3,277	6,749

Знайдений розподіл діаметрів плоских перерізів зерен (нормовані відносні частки $P'_k(d)$) застосували як вихідну інформацію до реконструкції розподілу діаметрів тривимірних зерен в об'ємі, а

саме для знаходження відносних часток $P(D_k)$. Для цієї реконструкції склали наступну систему рівнянь виду (2):

$$0,0017639=0,218P(D_{10})\sqrt{156^2-140,4^2};$$

$$0,0058203=0,218P(D_9)\sqrt{140,4^2-124,8^2}+1,186P(D_{10})(\sqrt{156^2-124,8^2}-\sqrt{156^2-140,4^2});$$

$$\begin{aligned}
0,0121302 &= 0,218P(D_8d) \sqrt{124,8^2 - 109,2^2} + 1,186P(D_9) (\sqrt{140,4^2 - 109,2^2} - \\
&\sqrt{140,4^2 - 124,8^2}) + 1,657P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 109,2^2} - \sqrt{156^2 - 124,8^2}); \\
0,0261979 &= 0,218P(D_7) \sqrt{109,2^2 - 93,6^2} + 1,186P(D_8) (\sqrt{124,8^2 - 93,6^2} - \\
&\sqrt{124,8^2 - 109,2^2}) + 1,657P(D_9) (\sqrt{140,4^2 - 93,6^2} - \sqrt{140,4^2 - 109,2^2}) + 1,807P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 93,6^2} - \\
&\sqrt{156^2 - 109,2^2}); \\
0,0682534 &= 0,218P(D_6) \sqrt{93,6^2 - 78^2} + 1,186P(D_7) (\sqrt{109,2^2 - 78^2} - \\
&\sqrt{109,2^2 - 93,6^2}) + \dots + 1,595P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 78^2} - \sqrt{156^2 - 93,6^2}); \\
0,1400243 &= 0,218P(D_5) \sqrt{78^2 - 62,4^2} + 1,186P(D_6) (\sqrt{93,6^2 - 62,4^2} - \\
&\sqrt{93,6^2 - 78^2}) + \dots + 1,478P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 62,4^2} - \sqrt{156^2 - 78^2}); \\
0,2342776 &= 0,218P(D_4) \sqrt{62,4^2 - 46,8^2} + 1,186P(D_5) (\sqrt{78^2 - 46,8^2} - \\
&\sqrt{78^2 - 62,4^2}) + \dots + 1,520P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 46,8^2} - \sqrt{156^2 - 62,4^2}); \\
0,2690290 &= 0,218P(D_3) \sqrt{46,8^2 - 31,2^2} + 1,186P(D_4) (\sqrt{62,4^2 - 31,2^2} - \\
&\sqrt{62,4^2 - 46,8^2}) + \dots + 1,773P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 31,2^2} - \sqrt{156^2 - 46,8^2}); \\
0,1923221 &= 0,218P(D_2) \sqrt{31,2^2 - 15,6^2} + 1,186P(D_3) (\sqrt{46,8^2 - 15,6^2} - \\
&\sqrt{46,8^2 - 31,2^2}) + \dots + 3,277P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 15,6^2} - \sqrt{156^2 - 31,2^2}); \\
0,0501813 &= 0,218P(D_1) \sqrt{15,6^2 - 0} + 1,186P(D_2) (\sqrt{31,2^2 - 0} - \sqrt{31,2^2 - 15,6^2}) + \dots + 6,749P(D_{10}) (\sqrt{156^2 - 0} - \\
&\sqrt{156^2 - 15,6^2}).
\end{aligned}$$

Здійснили реконструкцію розподілу діаметрів тривимірних зерен, вирішуючи наведену систему рівнянь, наприклад, за допомогою комп'ютера, знайшли таким чином відносні частки $P(D_k)$, розраховували нормовані значення $P'(D_k)$ з відношення

$P'(D_k) = P_k(D) / \sum_{k=1}^n P(D_k)$. У сукупності нормовані частки $P'(D_k)$ є розподілом розмірів тривимірних зерен в об'ємі. Отримані результати реконструкції наведені в таблиці 6.

Таблиця 6

№№ інтервалів k	Межі інтервалів $I_{\min} - I_{\max}$ МКМ	Розраховані відносні частки $P(D_k)$	Розподіл діаметрів тривимірних зерен в об'ємі (нормовані відносні частки)
1	0 - 15,6	0	0
2	15,6 - 31,2	0,0002562	0,0123003
3	31,2 - 46,8	0,0034519	0,1657365
4	46,8 - 62,4	0,0080690	0,3874205
5	62,4 - 78,0	0,0045595	0,2189163
6	78,0 - 93,6	0,0030213	0,1450612
7	93,6 - 109,2	0,0008780	0,0421574
8	109,2 - 124,8	0,0003152	0,0151361
9	124,8 - 140,4	0,0001574	0,0075585
10	140,4 - 156,0	0,0001190	0,0057132

Реконструйовані за пропонованим способом розподіли діаметрів плоских перерізів зерен $P'_k(d)$ і діаметрів тривимірних зерен $P'(D_k)$, а також вихідний розподіл довжин хорд $P_k(l)$ додатково представлені графічно (Фіг. 6).

На заключному етапі виконали розрахунок усіх параметрів для сукупностей тривимірних зерен, їх плоских і лінійних перерізів. Усі результати представлені в таблиці 7.

Таблиця 7

Об'єкт аналізу	Параметри структури	Значення параметрів
Розподіл хорд $P_k(l)$	Загальна кількість заміряних хорд, шт.	5815
	Середній розмір хорди, мкм	50,71
	Середньоквадратичне відхилення від середнього розміру хорд, мкм	24,70
	Коефіцієнт варіації розподілу розмірів хорд	48,71
	Модальний розмір хорд, мкм	46,8
	Кількість хорд на 1 мм	20
Розподіл плоских перерізів зерен $P_k(d)$	Середній діаметр плоских перерізів зерен, мкм	56,77
	Середньоквадратичне відхилення від середнього діаметра, мкм	24,23
	Коефіцієнт варіації розподілу діаметрів плоских перерізів зерен	42,67
	Модальний розмір діаметрів плоских перерізів, мкм	46,8
	Кількість плоских перерізів зерен на 1 мм ²	395
Розподіл зерен в об'ємі $P(D_k)$	Середній діаметр зерен в об'ємі	71,41
	Середньоквадратичне відхилення від середнього діаметра, мкм	20,319
	Коефіцієнт варіації розподілу діаметрів зерен в об'ємі	28,45
	Модальний діаметр зерен, мкм	62,4
	Максимальний діаметр зерен, мкм	156
	Кількість зерен в 1 мм	5244
Номер зерна за стандартом ГОСТ 5639		5

Використання способу найближчого з аналогів на тому ж плоскому перерізі зеренної структури (шліфі) призвело до отримання середнього діаметра тривимірних зерен $D_{cp} = 55,07$ мкм і середнього діаметра плоских перерізів зерен $d_{cp} = 48,4$ мкм, що за ГОСТ 5639 відповідає номеру 6 і свідчить про явну похибку способу.

Точність пропонованого способу визначення параметрів структури у порівнянні з найближчим з аналогів підвищилася в декілька разів, оскільки при реконструкції за двома наведеними системами рівнянь виду (7) і (2) врахована багатокутна форма плоских перерізів зерен за рахунок застосування визначених коефіцієнтів форми β_k і врахована саме реальна поліедрична форма тривимірних зерен за рахунок застосування визначених коефіцієнтів форми α_k . Крім того, точність пропонованого способу вища через урахування визначеної пропорційної залежності вірогідності потрапляння плоских перерізів зерен на січну лінію і самих об'ємних зерен на січну площину від розмірів, відповідно, плоских перерізів і зерен.

За необхідності застосування для аналізу структури рівномірної розмірної шкали з будь-якою іншою кількістю інтервалів, розподіл довжин хорд $P_k(l)_{cp}$, отриманих від статистично необхідної кількості типових плоских перерізів зерен для шкали, в даному випадку, з 10-ма інтервалами, представляють у графічному вигляді (Фіг. 7), шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як:

$l_1/l_{max}; l_2/l_{max}; \dots; l_k/l_{max}; \dots; l_{max}/l_{max}$; долі в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних довжин хорд від кола $P_k(l)_{кола}$, які розраховують за формулою

$P_k(l)_{кола} = \sqrt{d_k^2 - l_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми плоских перерізів зерен β_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою $\beta_k = P_k(l)_{cp} / P_k(l)_{кола}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{cp}$ і $P_k(l)_{кола}$ безпосередньо з побудованих графіків. Далі аналогічним чином знаходять коефіцієнти форми тривимірних зерен α_k , для чого розподіл довжин хорд $P_k(l)_{cp}$, отриманих від статистично необхідної кількості типових за формою максимальних плоских перерізів зерен для рівномірної шкали, в даному випадку, з 10-ма розмірними інтервалами, представляють у графічному вигляді, шкала при цьому застосовується у відносному вигляді як: $l_1/l_{max}; l_2/l_{max}; \dots; l_k/l_{max}; \dots; l_{max}/l_{max}$; в цих же осях координат будують відповідний графік розподілу відносних часток діаметрів кругів від сфери, які розраховують за формулою

$P_k(d)_{сфери} = \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2}$, і потім розраховують коефіцієнти форми α_k для рівномірної шкали з необхідною кількістю розмірних інтервалів за формулою $\alpha_k = P_k(l)_{cp} / P_k(d)_{сфери}$, знаходячи необхідні значення $P_k(l)_{cp}$ і $P_k(d)_{сфери}$ безпосередньо з побудованих графіків.

Крім того, значне розширення технологічних можливостей пропонованого способу обумовлене й тим, що він може бути застосований і до визначення основних параметрів структури із складовими сферичної форми (в цьому випадку коефіцієнти форми α_k і β_k в рівняннях (7) і (2)

дорівнюють одиниці), а також елементів структури поліедричної, сферичної, еліпсоїдної та подібних їм форм, в тому числі неметалевих включень, графітної і цементитної фаз, вторинних фаз, інтерметалевих фаз та ін., в цьому випадку видимим зображенням структури є зображення плоских перерізів цих елементів структури на шліфі.

Таким чином застосування пропонованого способу в порівнянні з найближчим з аналогів

дозволяє підвищити точність при одночасному розширенні технологічних можливостей способу визначення основних параметрів об'ємної структури металевих матеріалів, що збільшує круг його практичного застосування, наприклад, при вивченні впливу параметрів структури на властивості цих матеріалів, при розробці технологічних процесів виготовлення металевих виробів, способів і режимів їх термічної обробки.

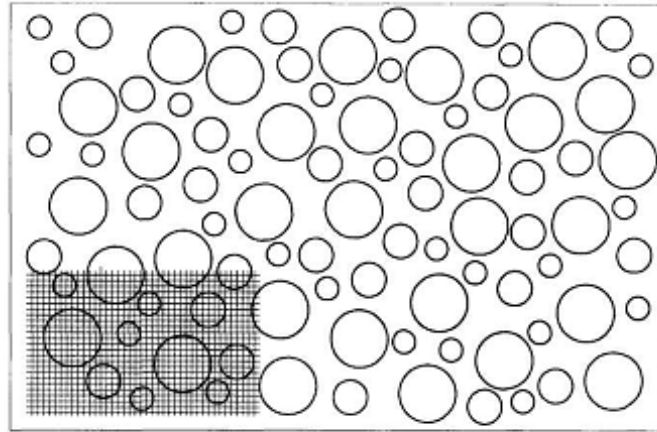


Fig. 1

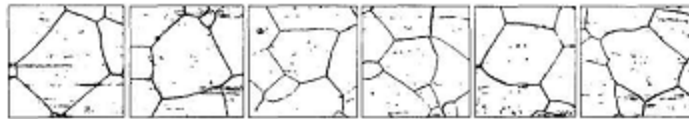


Fig. 2

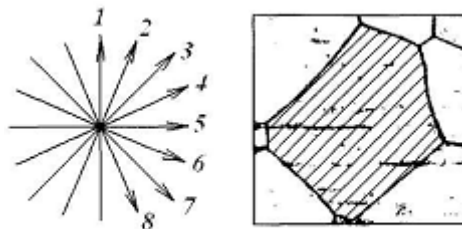
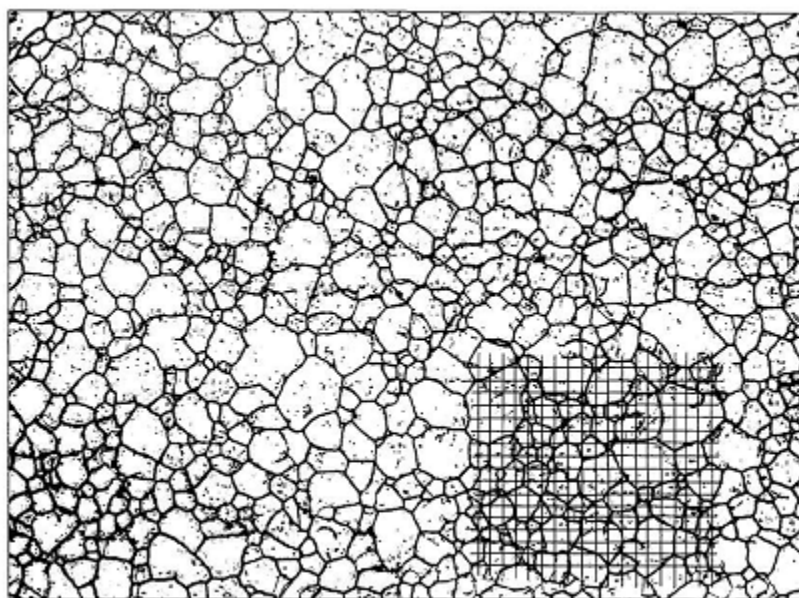
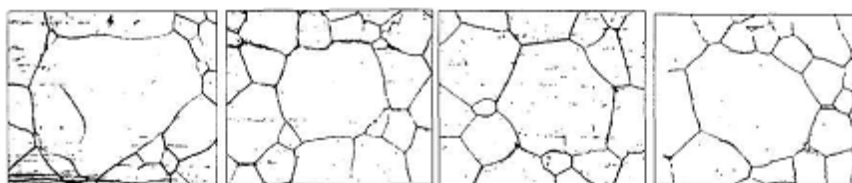


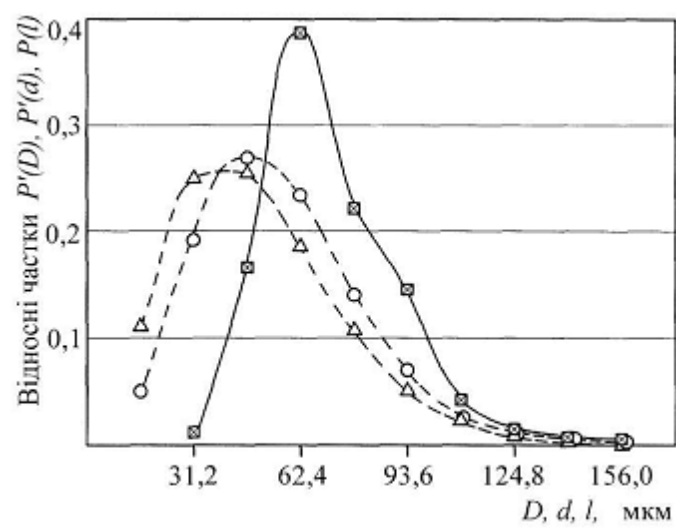
Fig. 3



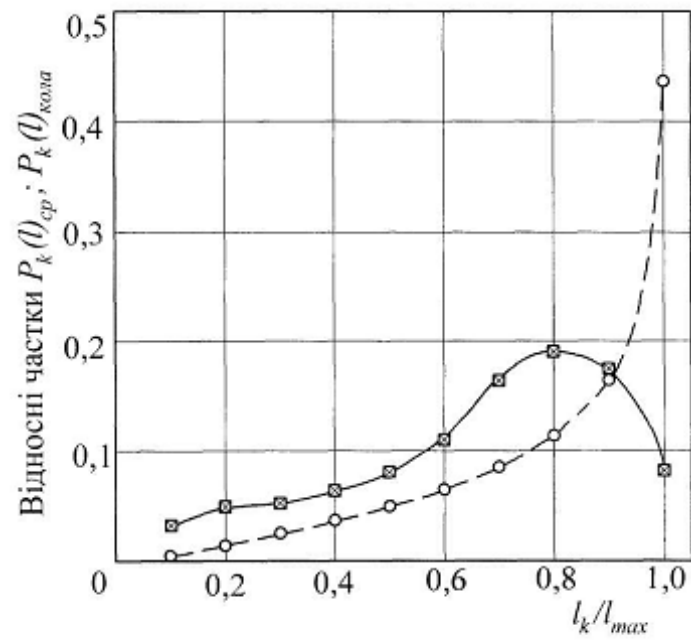
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7