

нанесенных на сталь 40X13 и сплав АМг2, которые будут обеспечивать нужный уровень диэлектрических свойств.

Z. A. Duryagina, V. Y. Pidkova, R. Petchak

Application of positron annihilation to study the structure
of the dielectric layers

Summary

The defect structure of dielectric layers of magnesium oxide and aluminum nitride by positron annihilation method is studied. The possibilities of the use a method for estimating parameters of the structure of the surface layers, which will provide the desired level of the dielectric properties are shown.

УДК 620.22

*Визначення параметрів об'ємної зеренної
структури металевих матеріалів*

Т. П. Даніленко, кандидат технічних наук

Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ

Представлено результати застосування способу визначення основних параметрів об'ємної структури металевих матеріалів, який враховує полідричну форму зерен, до аналізу аустенітної зеренної структури. Виходячи зі знайденого експериментально розподілу довжин хорд на металографічній січній площині зерен, було виконано стереологічну реконструкцію розподілу зерен-полідрів за розмірами і на його основі визначені основні параметри тривимірної зеренної структури. Показано значну відмінність розподілів розмірів і параметрів самої об'ємної структури і її плоского і лінійного перерізів.

В роботі представлено новий спосіб аналізу аустенітних зеренних структур [1 – 5]. Спосіб належить до методів стереологічної реконструкції розподілу діаметрів D тривимірних структурних складових $P(D_k)$, виходячи з розподілу $P_k(d)$ діаметрів d їх плоских перерізів або розподілу $P_k(l)$ довжин хорд l в обраній для аналізу рівномірній розмірній шкалі з n інтервалів. Вихідну інформацію про розподіли $P_k(d)$ або $P_k(l)$ отримують безпосередніми вимірами на металографічному шліфі, в тому числі за допомогою відповідних аналізаторів зображення, або на фотозображенні структури. Далі, якщо вихідною

інформацією є розподіл довжин хорд $P_k(l)$, складають і вирішують відносно невідомих $P_k(d)$ систему рівнянь виду

$$P_n(l) = \beta_1 P_n(d) \sqrt{d_n^2 - l_{n-1}^2},$$

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

.....

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

.....

$$P_1(l) = \beta_1 P_1(d) \sqrt{d_1^2 - 0} + \beta_2 P_2(d) (\sqrt{d_2^2 - 0} - \sqrt{d_2^2 - l_1^2}) + \dots + \beta_n P_n(d) (\sqrt{d_n^2 - 0} - \sqrt{d_n^2 - l_1^2})$$

де k – порядковий номер розмірного інтервалу від 1 до n ; l – довжини хорд; d – діаметри плоских перерізів зерен; $P_1(l), \dots, P_n(l)$ – відносні частки хорд, відповідно, 1-го, ..., n -го розмірних інтервалів; $P_1(d); \dots; P_n(d)$ – відносні частки плоских перерізів, відповідно, 1-го, ..., n -го розмірних інтервалів; β – коефіцієнти форми плоских перерізів зерен.

Згідно способу [1] розраховані $P_k(d)$ мають бути нормовані за формулою

$$P'_k(d) = P_k(d) / \sum_{k=1}^n P_k(d). \quad (2)$$

Після цього, використовуючи знайдені $P'_k(d)$ (або $P_k(d)$, встановлені безпосередніми вимірами на шліфі) як вихідну інформацію, складають і вирішують відносно невідомих $P(D_k)$ систему рівнянь виду

$$P'_n(d) = \alpha_1 P(D_n) \sqrt{D_n^2 - d_{n-1}^2}$$

$$P'_{n-1}(d) = \alpha_1 P(D_{n-1}) \sqrt{D_{n-1}^2 - d_{n-2}^2} + \alpha_2 P(D_n) (\sqrt{D_n^2 - d_{n-2}^2} - \sqrt{D_n^2 - d_{n-1}^2})$$

.....

$$P'_k(d) = \alpha_1 P(D_k) \sqrt{D_k^2 - d_{k-1}^2} + \alpha_2 P(D_{k+1}) (\sqrt{D_{k+1}^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_{k+1}^2 - d_k^2}) + \dots \quad (3)$$

$$+ \alpha_{n-k+1} P(D_n) (\sqrt{D_n^2 - d_{k-1}^2} - \sqrt{D_n^2 - d_k^2})$$

.....

$$P'_1(d) = \alpha_1 P(D_1) \sqrt{D_1^2 - 0} + \alpha_2 P(D_2) (\sqrt{D_2^2 - 0} - \sqrt{D_2^2 - d_1^2}) + \dots$$

$$+ \alpha_n P(D_n) (\sqrt{D_n^2 - 0} - \sqrt{D_n^2 - d_1^2})$$

де D – діаметри тривимірних зерен; $P'_1(d) \dots P'_n(d)$ – відносні частки плоских перерізів зерен, відповідно, 1-го, ..., n -го розмірних інтервалів; $P(D_1); \dots; P(D_n)$ – відносні частки тривимірних зерен, відповідно, 1-го, ..., n -го розмірних інтервалів; α – коефіцієнти форми тривимірних зерен.

Згідно способу [1] розраховані $P(D_k)$ мають бути нормовані за формулою

$$P'(D_k) = P(D_k) / \sum_{k=1}^n P(D_k). \quad (4)$$

Знайдений розподіл $P'(D_k)$ дозволяє розрахувати числові характеристики основних параметрів об'ємної зеренної структури, а також сукупностей плоских і лінійних перерізів зерен.

Однією з найважливіших переваг наведеного способу є те, що він дозволяє, завдяки застосуванню коефіцієнтів форми α і β , враховувати при реконструкції розподілу $P'(D_k)$ форму реальних зерен-поліедрів.

Питання опису форми несферичних об'єктів структури, до яких належать і зерна, та визначення розподілу їх за розмірами залишаються актуальними. В роботі [6] форма зерен і розподіли їх об'ємів за розмірами в сплаві алюміній – олово досліджували методами стереоскопічної мікрорадіографії. Одним із способів “проникнення” у 3-D зеренну структуру було розділення металевого зразка на окремі зерна, визначення ваги кожного і встановлення розподілу їх об'ємів за розмірами [7, 8]. В роботі [9] 3-D структуру відтворювали послідовним шліфуванням зразка. В деяких роботах методи реконструкції 3-D структури засновані на припущенні існування певного закону розподілу зерен за розмірами, наприклад, log-нормального [10].

Складність питання врахування форми металевих зерен при реконструкції розподілу $P(D_k)$ полягає в тому, що зерна є неправильними поліедрами, кожне з них має свою форму, яка відрізняється від форми інших зерен, і на площину шліфа з однаковою вірогідністю може потрапити будь-який переріз зерна – як мінімальний так і максимальний, утворюючи при цьому багатокутники різних форм. Це демонструє рис. 1, де наведено схему розсічення площиною Q системи кубічних октаедрів однакового розміру, але випадково орієнтованих у просторі і відносно площини Q . Картина утворення зеренної структури на металографічному шліфі ще складніша, оскільки форма і розміри зерен в реальних структурах неоднакові.

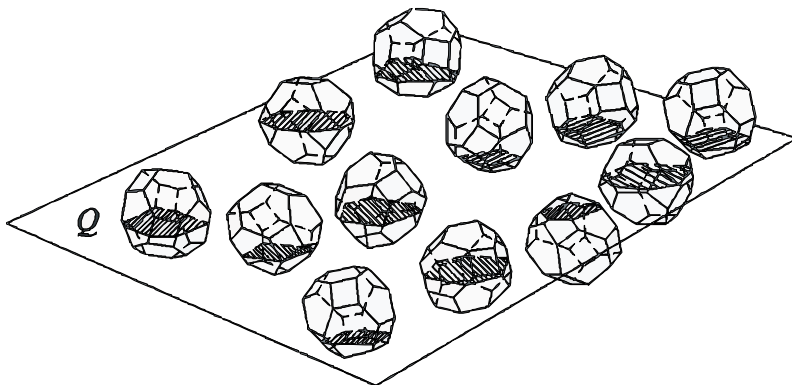


Рис. 1. Схема утворення на січній площині Q плоских перерізів від сукупності кубічних октаедрів.

У даному дослідженні системи рівнянь (1) і (3), але без коефіцієнтів форми, пристосовані до аналізу структур із складовими сферичної форми.

Пристосування методу до аналізу полідричних зеренних структур виконано введенням у формули коефіцієнтів форми α і β , якими враховується розбіжність у розподілах плоских і лінійних перерізів від сфери і зерна-поліедра по кожному розмірному інтервалу. Коефіцієнти форми α встановлено на основі співставлення розподілів розмірів плоских перерізів від сфери $P_k(d)_{\text{сфери}}$ і зерна-поліедра $P_k(d)_{\text{зерна}}$ середньостатистичної форми; аналогічно, коефіцієнти форми β встановлено на основі співставлення розподілів хорд від кола $P_k(l)_{\text{кола}}$ і від плоского зерна $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$ середньостатистичної форми. Методика визначення коефіцієнтів форми описана автором в роботах [1 – 5].

Коефіцієнти форми α_k та β_k встановлено в даному дослідженні в рівномірній розмірній шкалі з 10-ти інтервалів для аустенітних зеренних структур. Шкалу застосовували для кожного зерна у відносному вигляді як: $l_1/l_{\text{max}}; l_2/l_{\text{max}}; \dots; l_k/l_{\text{max}}; l_{\text{max}}/l_{\text{max}}$. Коефіцієнти форми для переходу від 1-D до 2-D розподілу встановили із співвідношення

$$\beta_k = P_k(l)_{\text{плоского зерна}} / P_k(l)_{\text{кола}}, \quad (5)$$

для якого $P_k(l)_{\text{кола}}$ розраховано для кола діаметром $d = 1$ умовній одиниці (ум. од.) за формулою

$$P_k(l) = \sqrt{1^2 - l_{k-1}^2} - \sqrt{1^2 - l_k^2}. \quad (6)$$

$P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$ встановили експериментально за схемою, представленою докладно в роботах [1 – 5], для чого обрали для аналізу 40 типових за формою плоских зерен різного розміру, на зображення кожного з них нанесли під рівним кутом одна до другої по 8 груп паралельних рівновіддалених січних, як показано на рис. 2, виміряли хорди, що утворилися в результаті перерізу січних межами зерна, визначили максимальну хорду l_{max} , склали розмірну шкалу у відносному вигляді ($l_1/l_{\text{max}}; l_2/l_{\text{max}}; \dots; l_k/l_{\text{max}}; l_{\text{max}}/l_{\text{max}}$) і розподілили

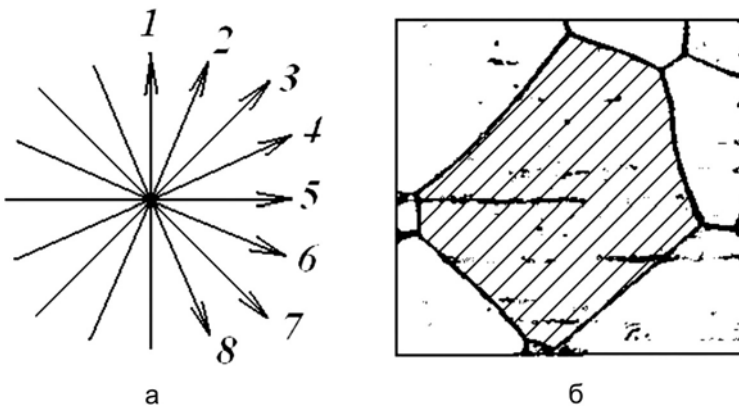


Рис. 2. Напрямки (1 – 8) нанесення на плоский переріз зерна восьми груп паралельних рівновіддалених січних (а) і приклад (б) нанесення січних напрямку 3 на зерно для встановлення розподілу $P_k(l)$.

заміряні хорди у відносних частках по розмірних інтервалах. Потім для кожного з 10-ти розмірних інтервалів розраховали середні відносні частки хорд $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$ по 40-ка плоских зернах і за формулою (5) розраховали коефіцієнти форми для кожного з 10-ти розмірних інтервалів. Коефіцієнти форми β_k , а також розподіли $P_k(l)_{\text{кола}}$ і $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$ наведені у табл. 1 графічно розподіли представлені на рис. 3. При цьому $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$ вважали середньостатистичним для аустенітних зеренних структур.

Таблиця 1

Розподіли $P_k(l)_{\text{кола}}$, $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$, $P_k(l)_{\text{сфери}}$, $P_k(l)_{\text{зерна}}$ і коефіцієнти форми α_k і β_k для аустенітних зеренних структур

Номер розмірного інтервалу k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Інтервал, ум. одиниці довжини	0,0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9	0,9-1,0
$P_k(l)_{\text{плоск. зерна}}, \%$	3,288	4,95	5,264	6,397	8,111	10,985	16,345	19,046	17,437	8,177
$P_k(l)_{\text{кола}}, \%$	0,501	1,519	2,586	3,742	5,049	6,603	8,586	11,414	16,411	43,589
Коефіцієнти форми β_k	β_{10}	β_9	β_8	β_7	β_6	β_5	β_4	β_3	β_2	β_1
	6,563	3,259	2,036	1,71	1,607	1,664	1,904	1,669	1,063	0,188
$P_k(l)_{\text{зерна}}, \%$	3,381	4,978	4,584	5,687	7,463	10,53	15,516	18,91	19,459	9,494
$P_k(l)_{\text{сфери}}, \%$	0,501	1,519	2,586	3,742	5,049	6,603	8,586	11,414	16,411	43,589
Коефіцієнти форми α_k	α_{10}	α_9	α_8	α_7	α_6	α_5	α_4	α_3	α_2	α_1
	6,749	3,277	1,773	1,52	1,478	1,595	1,807	1,657	1,186	0,218

Коефіцієнти форми для переходу від 2-D до 3-D розподілу встановили із співвідношення

$$\alpha_k = P_k(d)_{\text{зерна}} / P_k(d)_{\text{сфери}}. \quad (7)$$

У наведеному співвідношенні $P_k(d)_{\text{сфери}}$ дорівнює розрахованому $P_k(l)_{\text{кола}}$, що пояснюється простими геометричними спів-відношеннями сфери і кола. А для встановлення розподілу плоских перерізів $P_k(d)$ зерна-поліедра, як було доведено в роботах автора [2, 4], достатньо встановити розподіл хорд $P_k(l)$ на максимальному плоскому перерізі цього зерна і прийняти його за $P_k(d)$. Тому для встановлення середньостатистичного розподілу $P_k(d)_{\text{зерна}}$ січні лінії за наведеною вище схемою нанесли на кожне з 20-ти типових за формою плоских зерен, але максимальних розмірів, які спостерігали на шліфах, вважаючи, що кожне з них і є максимальним плоским перерізом для того зерна, від якого воно отримане. Далі вимірювали отримані хорди і по них встановили середньостатистичний розподіл $P_k(d)_{\text{зерна}}$ для аустенітної структури. Коефіцієнти форми α_k , а також знайдені розподіли $P_k(d)_{\text{сфери}}$ і $P_k(d)_{\text{зерна}}$ наведені у табл. 1 і графічно розподіли представлені на рис. 3.

Попередній аналіз, виконаний в роботах [2, 4], показав, що обрана кількість плоских перерізів зерен (40 і 20), а також 8 груп паралельних січних ліній, які наносять на плоскі зерна, статистично достатня для дослідження форми зерен.

Наступною задачею було практичне застосування розробленого методу [1] до реконструкції розподілу розмірів зерен-поліедрів $P(D_k)$ аустенітної структури, визначення основних параметрів об'ємної структури і їх порівняння із параметрами структури на плоскому її перерізі, тобто на шліфі. Вихідною інформацією для дослідження був розподіл хорд $P_k(l)$, отриманий експериментально шляхом нанесення січних ліній на зображення структури (рис. 4), наступного вимірювання довжин хорд, отриманих в результаті пересічення ліній границями зерен, і розподілу хорд за розмірами в рівномірній шкалі із 10-ти інтервалів. Оскільки максимальна із заміряних хорд становила 156 мкм, то шкала із 10-ти інтервалів мала ціну поділки 15,6 мкм, звідки 1-й розмірний інтервал відповідав (0 – 15,6) мкм, другий (15,6 – 31,2) мкм і т.д. Результати вимірів наведені в табл. 2.

Виходячи з знайденого розподілу хорд $P_k(l)$ було складено систему рівнянь виду (1), а саме:

$$\begin{aligned}
 0,0007023 &= 0,188P_0(d)\sqrt{156^2 - 140,4^2}; \\
 0,0037927 &= 0,188P_9(d)\sqrt{140,4^2 - 124,8^2} + 1,063P_{10}(d)(\sqrt{156^2 - 124,8^2} - \sqrt{156^2 - 140,4^2}); \\
 0,0106757 &= 0,188P_8(d)\sqrt{124,8^2 - 109,2^2} + 1,063P_9(d)(\sqrt{140,4^2 - 109,2^2} - \\
 &\quad - \sqrt{140,4^2 - 124,8^2}) + 1,669P_{10}(d)(\sqrt{156^2 - 109,2^2} - \sqrt{156^2 - 124,8^2}); \\
 &\dots\dots \\
 0,2486304 &= 0,188P_2(d)\sqrt{31,2^2 - 15,6^2} + 1,063P_3(d)(\sqrt{46,8^2 - 15,6^2} - \sqrt{46,8^2 - 31,2^2} + \dots \\
 &\quad + 3,259P_{10}(d)(\sqrt{156^2 - 15,6^2} - \sqrt{156^2 - 31,2^2}); \\
 0,1119539 &= 0,188P_1(d)\sqrt{15,6^2 - 0} + 1,063P_2(d)(\sqrt{31,2^2 - 0} - \sqrt{31,2^2 - 15,6^2}) + \dots \\
 &\quad + 6,563P_{10}(d)(\sqrt{156^2 - 0} - \sqrt{156^2 - 15,6^2}).
 \end{aligned}$$

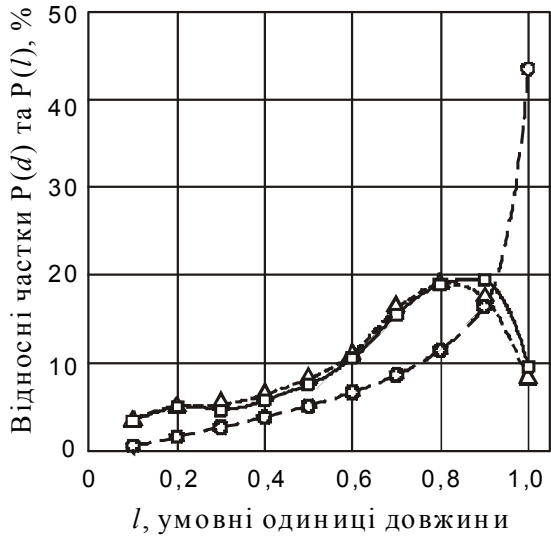


Рис. 3. Розподіл плоских перерізів $P_k(d)$ (□-□) і хорд $P_k(l)$ (Δ-Δ) від середньостатистичного за формою зерна-поліедра і від сфери (○-○).

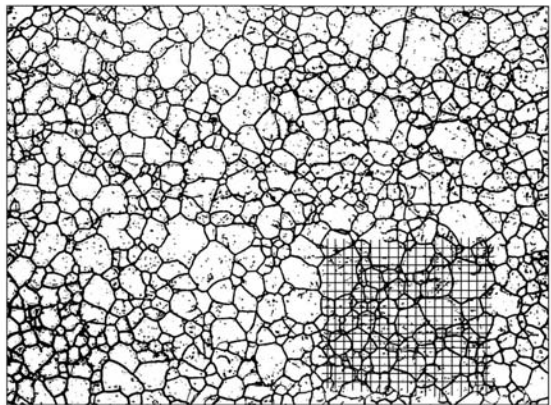


Рис. 4. Зеренна структура, для якої встановлено розподіл хорд $P_k(l)$ шляхом нанесення січних ліній за наведеною схемою.

Таблиця 2

Розподіл заміряних хорд $P_k(l)$ по розмірах і реконструйовані розподіли $P'_k(d)$ і $P'(D_k)$

Номер інтервалу k	Межі інтервалів $l_{\min} - l_{\max}$, мкм	Кількість хорд по інтервалах, шт.	$*P_k(l)$	** $P'_k(d)$	*** $P'(D_k)$
1	0 – 15,6	797	0,1119539	0,0570856	0
2	15,6 – 31,2	1770	0,2486304	0,2079052	0,0505909
3	31,2 – 46,8	1832	0,2573395	0,2689972	0,1705005
4	46,8 – 62,4	1328	0,186543	0,2270962	0,3605617
5	62,4 – 78,0	751	0,1054923	0,1328745	0,2183975
6	78,0 – 93,6	365	0,0512712	0,0627917	0,1340614
7	93,6 – 109,2	168	0,0235988	0,0244475	0,0403712
8	109,2 – 124,8	76	0,0106757	0,011548	0,0118833
9	124,8 – 140,4	27	0,0037927	0,0056575	0,0081703
10	140,4 – 156,0	5	0,0007023	0,0015966	0,0054632

* $P_k(l)$ – відносні частки хорд;
 ** $P'_k(d)$ – нормовані відносні частки діаметрів плоских перерізів зерен;
 *** $P'(D_k)$ – нормовані відносні частки діаметрів зерен-полієдрів

Із системи рівнянь знайшли невідомі $P_k(d)$ і пронормували їх за формулою (2), визначивши таким чином $P'_k(d)$.

Використовуючи знайдені $P'_k(d)$ як вихідну інформацію, розрахували розподіл діаметрів зерен-полієдрів $P(D_k)$, для чого склали і вирішили відносно невідомих $P(D_k)$ систему рівнянь виду (3), а саме:

$$\begin{aligned}
 0,0015966 &= 0,218P(D_{10})\sqrt{156^2 - 140,4^2}; \\
 0,0056575 &= 0,218P(D_9)\sqrt{140,4^2 - 124,8^2} + 1,186P(D_{10})(\sqrt{156^2 - 124,8^2} - \sqrt{156^2 - 140,4^2}); \\
 0,0115480 &= 0,218P(D_8)\sqrt{124,8^2 - 109,2^2} + 1,186P(D_9)(\sqrt{140,4^2 - 109,2^2} - \sqrt{140,4^2 - 124,8^2}) + \\
 &+ 1,657P(D_{10})(\sqrt{156^2 - 109,2^2} - \sqrt{156^2 - 124,8^2}); \\
 &\dots\dots \\
 0,2079052 &= 0,218P(D_2)\sqrt{31,2^2 - 15,6^2} + 1,186P(D_3)(\sqrt{46,8^2 - 15,5^2} - \sqrt{46,8^2 - 31,2^2}) + \dots \\
 &+ 3,277P(D_{10})(\sqrt{156^2 - 15,6^2} - \sqrt{156^2 - 31,2^2}); \\
 0,0570856 &= 0,218P(D_1)\sqrt{15,6^2 - 0} + 1,186P(D_2)(\sqrt{31,2^2 - 0} - \sqrt{31,2^2 - 15,6^2}) + \dots \\
 &+ 6,749P(D_{10})(\sqrt{156^2 - 0} - \sqrt{156^2 - 15,6^2}).
 \end{aligned}$$

Розраховані $P(D_k)$ пронормували за формулою (4), визначивши таким чином $P'(D_k)$.

Для виконання усіх розрахунків (рішення систем рівнянь, розрахунки параметрів структури) розроблена комп'ютерна програма, за якою процес розрахунків займає декілька секунд.

Результати дослідження, які наведені у табл. 2 і на рис. 5, показали значну розбіжність розподілів $P'(D_k)$ з $P'_k(d)$ і $P_k(l)$, що відбилося і на значеннях основних параметрів об'ємної структури і її перерізів (табл. 3).

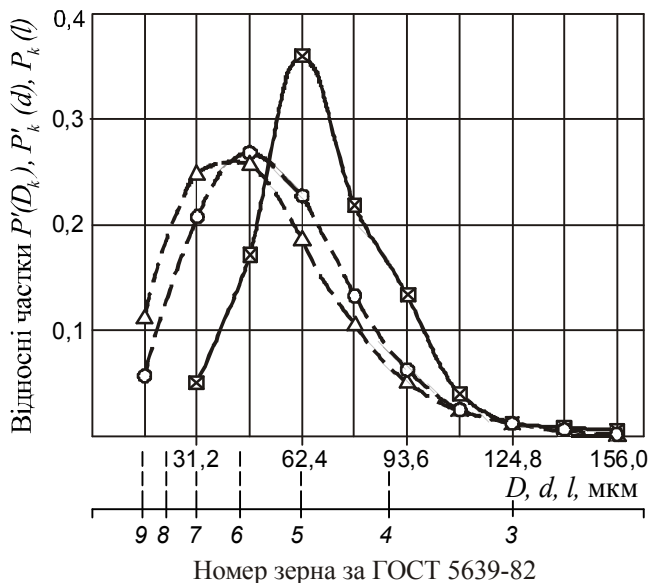


Рис. 5. Встановлений вихідний розподіл хорд $P_k(l)$ (Δ - Δ) і реконструйовані розподіли діаметрів плоских перерізів зерен $P'_k(d)$ (\circ - \circ) і діаметрів об'ємних зерен $P'(D_k)$ (\boxtimes - \boxtimes) для структури, зображеної на рис. 4, та відповідність розмірів D, d, l (мкм) номерам зерен за ГОСТ 5639-82.

Таблиця 3

Параметри реконструйованої об'ємної зернової структури і її плоского і лінійного перерізів

Об'єкт аналізу	Параметри структури	Значення параметрів
Розподіл хорд $P_k(l)$	Загальна кількість заміряних хорд, шт.	7119
	Середній розмір хорди l_{cp} , мкм	50,77
	Середньо-квадратичне відхилення від середнього розміру хорд, мкм	24,75
	Коефіцієнт варіації K_l розподілу розмірів хорд	0,49
	Модальний розмір хорд, мкм	40,8
	Кількість хорд на 1 мм	20
Розподіл плоских перерізів зерен $P'_k(d)$	Середній діаметр d_{cp} плоских перерізів зерен, мкм	55,53
	Середньо-квадратичне відхилення від середнього діаметру,	24,21
	Коефіцієнт варіації K_d розподілу діаметрів плоских	0,44
	Модальний розмір діаметрів плоских перерізів, мкм	46,8
	Кількість плоских перерізів зерен на 1 мм^2 , шт.	413
	Номер зерна за ГОСТ 5639-82	6
Розподіл зерен в об'ємі $P'(D_k)$	Середній діаметр D_{cp} зерен в об'ємі, мкм	69,53
	Середньо-квадратичне відхилення від середнього діаметру,	21,35
	Коефіцієнт варіації K_D розподілу діаметрів зерен в об'ємі	0,31
	Модальний діаметр зерен, мкм	62,4
	Максимальний діаметр зерен, мкм	156
	Кількість зерен в 1 мм^3 , шт.	5682
Номер зерна об'ємної структури	5	

Так, середній діаметр об'ємних зерен $D_{cp} = 69,53$ мкм значно перевищує середній діаметр плоских перерізів $d_{cp} = 55,53$ мкм і середню довжину хорд $l_{cp} = 50,77$ мкм, а різнозернистість, показниками якої можна вважати середньоквадратичне відхилення і коефіцієнт варіації K , у реальної об'ємної структури менше, ніж для її плоских та лінійних перерізів ($K_D = 0,31$, $K_d = 0,44$, $K_l = 0,49$), тобто в даному випадку реальна просторова структура більш однорідна, ніж вона виглядає на площині шліфа.

Відповідно до ГОСТ 5639-82 проаналізована на шліфі 2-D структура має бути оцінена номером 6 ($m = 384 \dots 768$ шт.; $d_m = 44$ мкм; $d_L = 39,1$ мкм), оскільки для неї встановлено $m = 413$ шт.; $d_{cp} = 55,53$ мкм; $d_L = l_{cp} = 50,77$ мкм. А за показниками об'ємної структури ($D_{cp} = 69,53$ мкм) середня величина зерен має бути визначена як 5 номер і навіть крупніше.

Для підтвердження вірності виконаних розрахунків для структури, наведеної на рис. 5, безпосередньо на зображенні структури за відповідним методом ГОСТ 5639-82 підраховували кількість зерен на площі в 1 мм^2 . Розрахована запропонованим методом кількість зерен (413 шт.) відрізняється від встановленої безпосереднім підрахунком на зображенні структури (425 шт.) тільки на 12 шт., що становить 2,8 % і свідчить про вірність виконаного за розробленим методом [1] дослідження.

Таким чином, представлений спосіб визначення основних параметрів структури дозволяє визначати параметри саме об'ємної реальної тривимірної структури, яка впливає на властивості металевих матеріалів.

Відповідно до патенту [1] для рівномірної шкали з будь-якою кількістю розмірних інтервалів запропоновано спочатку будувати графіки, аналогічні представленим на рис. 3, у шкалі з не менш як 7-ма розмірними інтервалами, а коефіцієнти форми для шкали з більшою кількістю інтервалів розраховувати, визначаючи необхідні $P_k(d)_{\text{зерна}}$, $P_k(d)_{\text{сфери}}$, $P_k(l)_{\text{плоского зерна}}$, $P_k(l)_{\text{кола}}$ безпосередньо з графіків. Таким чином спрощується процедура визначення коефіцієнтів форми за необхідності зміни розмірної шкали.

Спосіб може бути застосований до аналізу будь-яких інших елементів структури поліедричної, сферичної, еліпсоїдної та подібних їм форм, в тому числі неметалевих включень, графітної і цементитної фаз, вторинних фаз, інтерметалевих фаз та ін., для яких, відповідно до патенту [1], за наведеною схемою слід визначити коефіцієнти форми.

Література

1. 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.
2. Даниленко 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.
3. Danilenko T. Proc. 1-st Int. Conf. "Development, Testing and Application of Materials". – Croatia, 1996. – P. 89 – 95.

4. А.с. 1397832 СССР. Способ определения распределения размеров плоских сечений зерна металлографических образцов / Е.Я. Лезинская, Т.П. Даниленко. // Бюл. изобретений. – 1988. – № 19.
5. Даниленко Т.П. Застосування стереології до аналізу металевих зеренних структур. // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 35 – 42.
6. Williams W., Smith C. // Trans. AIME. – 1952. – 194. – P. 755 – 761.
7. Rhines F.N., Patterson B.R. // Metal Trans. – 1982. – 13A. – P. 985 – 993.
8. Takayama Y., Tozawa T. // Proc. Conf. on Science and Engineering of Light Metals.RASELM'91. – Tokyo, Japan. – Oct. 1991. – P. 947 – 952.
9. Steele G.H. // Proc. Second Int. Cong. for Stereology. – New York. – 1967. – P. 74 – 76.
10. Takayama Y., Furushiro N. // Mat. Trans. JIM. – 1991. – 32, № 3. – P. 214 – 221.

Одержано 28.01.13

Т. П. Даниленко

**Определение параметров объемной зеренной структуры
металлических материалов**

Резюме

Представлены результаты применения способа определения основных параметров объемной структуры металлических материалов, учитывающего полиэдрическую форму зерен, к анализу аустенитной зеренной структуры. Исходя из найденного экспериментально распределения длин хорд на металлографической секущей плоскости, была выполнена стереологическая реконструкция распределения зерен-полиэдров по размерам и на ее основе определены основные параметры трехмерной зеренной структуры. Показано значительное отличие распределений размеров и параметров самой объемной структуры и ее плоского и линейного сечений.

T. P. Danilenko

**Determination of the three-dimensional grain structure
parameters of the metallic materials**

Summary

Application results of the method for determining of the main parameters of three-dimensional metallic materials structure to austenitic grain steels analysis are presented. Method accounts of the polyhedral grain shape. On the basis of experimentally found chord length distribution on two-dimensional plane, stereological reconstruction of the metallic polyhedral grain size distribution was calculated, and on the basis it three-dimensional grain structure parameters were calculated. There are demonstrated the significant differences between grain size, intercept length and plane section size distributions and structure parameters.