

## Аналіз понять величини і діаметра зерна в дослідженнях металевих структур

Т. П. Даніленко, кандидат технічних наук

Державний економіко-технологічний університет транспорту, Київ

*Показано, що визначення за основними стандартами величини зерна в металевих структурах як середньої величини перерізів тривимірних зерен в площині металографічного шліфа, є недостатнім для стереологічних досліджень полідисперсних зеренних структур, які передбачають вимірювання розмірів окремих зерен. Показано, що оскільки об'єктивною мірою величини окремого плоского перерізу зерна-поліедра є його площа, то діаметром плоского зерна може бути як діаметр рівновеликого цьому зерну кола, так і середня довжина хорд, проведених через центр ваги плоского зерна.*

Згідно основних стандартів для визначення величини зерна в металевих структурах ГОСТ 5639-82 [1], ISO 643:2003 [2] зерна металів – це окремі кристали полікристалічного конгломерату, розділені між собою поверхнями, які називаються границями зерен, тобто зерна розглядають як тривимірні об'єкти і відомо [3], що вони мають форму неправильних поліедрів. А «величина зерна» за ГОСТ – це «середня величина випадкових перерізів зерен у площині металографічного шліфа», тобто в поняття величини зерна вкладене тільки середнє її значення і тільки у застосуванні до плоских перерізів тривимірних зерен (назвемо ці перерізи плоскими зернами).

Однак, на властивості виробу впливає саме об'ємна тривимірна структура, а не її двовимірне зображення на металографічному шліфі. Співвідношення тривимірної структури і її плоского перерізу вивчає стереологія. Основним об'єктом стереологічного аналізу полідисперсних зеренних структур є розподіли розмірів зерен, їх плоских і лінійних перерізів і співвідношення цих розподілів [4, 5]. Тому для цих досліджень визначення величини зерна тільки як «середньої величини випадкових перерізів зерен у площині металографічного шліфа» є недостатнім, оскільки в цих дослідженнях аналізують у сукупності окремі зерна, які мають різні розміри і форму. Для таких досліджень необхідно визначитись, що слід розуміти під величиною і діаметром окремих об'ємних і плоских зерен.

За формою плоскі зерна є неправильними багатокутниками. Об'єктивною мірою величини окремого плоского зерна є його площа  $S$ , виходячи з якої можна визначити об'єктивний лінійний показник розміру – діаметр цього рівновеликого кола  $d_s$ . Другою об'єктивною лінійною характеристикою розміру плоского зерна можна вважати середню довжину хорд  $d_{cp}$ , проведених через його центр ваги. В даному дослідженні поставлена задача встановити співвідношення  $d_{cp}$  і  $d_s$ , що дозволить ясніше зрозуміти, що таке діаметр плоского зерна-багатокутника.

Виходячи з поставленої задачі, було проаналізовано співвідношення діаметрів деяких правильних багатокутників (як моделей плоских зерен), а також реальних плоских зерен з діаметрами рівновеликих їм кіл.

Діаметром правильного багатокутника вважається діаметр описаної окружності [6]. Але в даному дослідженні важливим є діаметр, безпосередньо пов'язаний з площею багатокутника, тобто діаметр рівновеликого кола  $d_s$ , а також середня довжина хорд, проведених через середину багатокутника. З правильних багатокутників для аналізу взяті 5-ти, 6-ти і 8-микутник, побудовані на основі описаної окружності діаметром 70 мм. Створення вказаних багатокутників і всі вимірювання виконані в комп'ютерній програмі «Компас». На кожен багатокутник були нанесені 16 січних ліній, кут між сусідніми лініями становив  $11,25^\circ$ , після чого були заміряні довжини отриманих хорд і розрахована їх середня довжина  $d_{cp}$ .

Були визначені площі багатокутників  $S$ , а потім – діаметри  $d_s$  рівновеликих кіл за формулою

$$d_s = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} .$$

Результати дослідження, наведені в табл. 1, показали близькість середньої довжини хорд  $d_{cp}$  і діаметра рівновеликого багатокутнику кола  $d_s$ , відмінність не перевищує 0,3 %, з чого зроблено висновок, що з великим ступенем достовірності за діаметр багатокутника можна приймати як діаметр рівновеликого кола  $d_s$ , так і середню довжину хорд  $d_{cp}$ , що є важливим для оцінювання розмірів реальних плоских зерен.

Таблиця 1

Співвідношення діаметра рівновеликого багатокутнику кола  $d_s$   
і середньої довжини хорд  $d_{cp}$

Багатокутник	Середня довжина хорд $d_{cp}$ , мм	Параметри рівновеликого кола		Відмінність між параметрами $d_{cp}$ і $d_s$	
		площа $S$ , мм <sup>2</sup>	діаметр $d_s$ , мм	абсолютне, мм	відносне, %
5-тикутник	60,78	2912,65	60,91	0,13	0,21
6-тикутник	63,63	3182,64	63,67	0,04	0,06
8-микутник	66,64	3464,82	66,44	0,20	0,30

Аналогічні дослідження проведені для шістьох плоских зерен, наведених на рис. 1 а, в. Для цього в програмі «Компас» були створені схеми зерен і за допомогою цієї ж програми виміряні площі зерен і довжини хорд, отриманих в результаті нанесення на схеми зерен січних ліній, які проходили через центр ваги зерна (рис. 1 б, г). Січні наносили під рівним кутом  $11,25^\circ$  одна до одної (на рис. 1 показані тільки хорди з кутом між ними  $22,5^\circ$ ), параметри зерен визначали в мм і мм<sup>2</sup>. Виходячи із заміряної площі кожного зображення зерна, розраховували діаметр рівновеликого кола

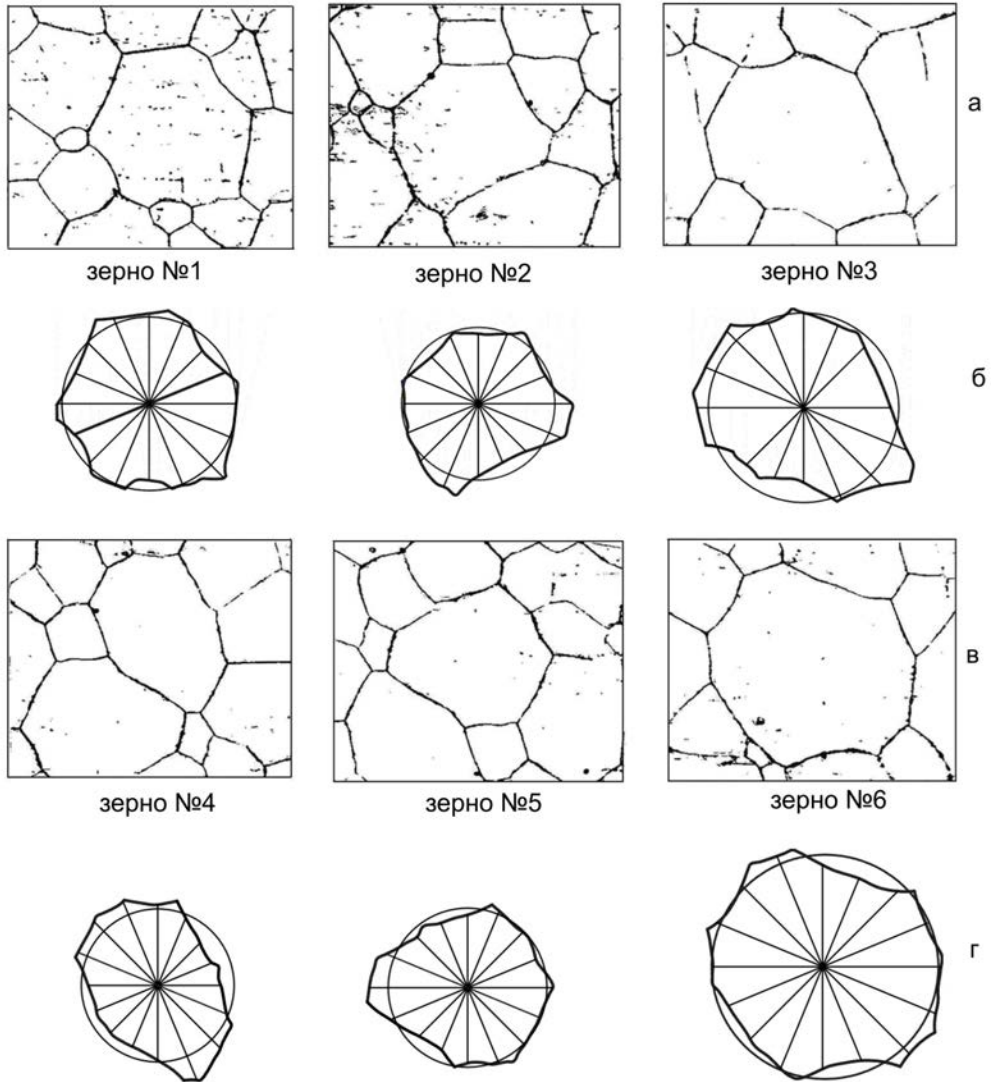


Рис. 1. Плоскі зерна (а, в) та їх схеми (б, г) з рівновеликими колами і хордами, проведеними через центр ваги зерна.

і це коло розташували на схемі зерна так, що центр кола співпадав із центром ваги зерна. Результати вимірювань і розрахунків представлені в табл. 2, з яких видно, що для зерен середня довжина хорд  $d_{cp}$  менша за діаметр рівновеликого кола  $d_s$  на незначну величину, від 0,25 до 1,03 %, при цьому для зерен округлої форми ця різниця менша, а для зерен витягнутої форми – становить близько 1 %. Очевидно, що збільшення кількості нанесених на зерна січних ліній має збільшувати близькість  $d_{cp}$  до  $d_s$ .

Таким чином, дослідження показали, що під діаметром плоского зерна-багатокутника можна розуміти як діаметр рівновеликого зерну кола  $d_s$ , так і середню довжину хорд  $d_{cp}$ , проведених через центр ваги зерна.

Таблиця 2

Співвідношення середньої довжини хорд  $d_{cp}$  плоского зерна і діаметра  $d_s$  рівновеликого зерну кола

№ зерна	Середня хорда $d_{cp}$ , мм	Параметри рівновеликого кола		Відмінність між параметрами $d_{cp}$ і $d_s$	
		площа $S$ , мм <sup>2</sup>	діаметр $d_s$ , мм	абсолютне мм	відносне, %
1	31,45	780,57	31,53	0,08	0,25
2	27,56	603,15	27,72	0,16	0,58
3	34,12	930,71	34,43	0,31	0,9
4	26,91	584,12	27,19	0,28	1,03
5	28,09	626,27	28,25	0,16	0,57
6	39,21	1216,69	39,37	0,16	0,41

Оскільки об'єктом стереологічних досліджень є тривимірна структура, було доцільним розглянути співвідношення деяких розмірних параметрів тривимірного зерна-поліедра.

Мірою величини тривимірного зерна-поліедра є його об'єм  $V$ , знаючи який можна визначити діаметр рівновеликої сфери  $D_v$ , який і слід прийняти за лінійну характеристику величини зерна. В той же час доцільно встановити для деяких поліедрів співвідношення між  $D_v$  і діаметрами описаних  $D_{op}$  і вписаних  $D_{вп}$  сфер, як об'єктів, які посередньо характеризують об'єм поліедра і діаметри яких наочно можуть сприйматись дослідником як лінійні характеристики розмірів зерен.

Для дослідження взяті три поліедри, які часто використовують як моделі металевих зерен [3, 7]: додекаедр, зрізаний октаедр і кубооктаедр (рис. 2).

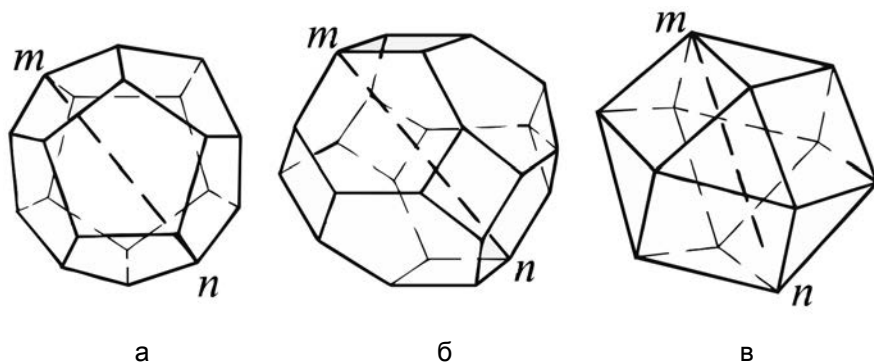


Рис. 2. Поліедри, які аналізували, і положення діаметрів  $mn$  описаних сфер. а – додекаедр, б – зрізаний октаедр, в – кубооктаедр.

Додекаедр є правильним поліедром з 12-ма гранями у вигляді правильних 5-кутників. Зрізаний октаедр належить до напівправильних поліедрів, має 14 граней у вигляді 8-ми правильних шестикутників і 6-ти квадратів. Це єдине архімедове тіло, яким можна повністю заповнити

тривимірний простір. Кубооктаедр є також напівправильним поліедром з 14-ма гранями у вигляді 8-ми правильних трикутників і 6-ти квадратів.

Прийнявши довжину ребра кожного поліедра такою, що дорівнює 10 мм, за відомими формулами [8] розрахували об'єми кожного поліедра  $V$ , а потім – діаметри рівновеликих сфер  $D_V$  і для додекаедра і зрізаного октаедра – діаметри описаних  $D_{on}$  і вписаних  $D_{en}$  сфер (для зрізаного октаедра вписана сфера торкається тільки квадратних граней):

$$\text{для додекаедра: } V = \frac{a^3}{4}(15 + 7\sqrt{5}); \quad D_{on} = \frac{a}{2}(1 + \sqrt{5})\sqrt{3}; \quad D_{en} = \frac{a}{2}\sqrt{10 + \frac{22}{\sqrt{5}}};$$

$$\text{для усіченого октаедра: } V = 8\sqrt{2}a^3; \quad D_{on} = 2a\sqrt{\frac{5}{2}}; \quad D_{en} = 2a\sqrt{2};$$

$$\text{для кубооктаедра: } V = \frac{5a^3}{3}\sqrt{2}.$$

Результати розрахунків, наведених в табл. 3, показали близькість  $D_V$ ,  $D_{on}$  і  $D_{en}$ , хоча однозначних співвідношень не виявлено: для додекаедра  $D_V$  має проміжне значення між  $D_{on}$  і  $D_{en}$ , а для зрізаного октаедра  $D_V$  менше, ніж  $D_{on}$  і  $D_{en}$ , і ближче до  $D_{en}$ .

Таблиця 3

Результати розрахунків параметрів поліедрів

Поліедр	Параметри поліедрів			
	Об'єм $V, \text{мм}^3$	Діаметри, мм		
		рівновелика сфера $D_V$	описана сфера $D_{on}$	вписана сфера $D_{en}$
Додекаедр	7663	24,5	28,0	22,3
Зрізаний октаедр	11314	27,9	31,6	28,3
Кубооктаедр	2357	16,5	–	–

У дослідженнях, які не є стереологічними і спрямовані на визначення середньої величини зерна за ГОСТ 5639-82, середню площу плоских зерен а визначають, виходячи з кількості зерен  $n$  на  $1 \text{ мм}^2$  за співвідношенням

$$a = 1/m, \text{ з якого } m = 1/a.$$

Середній діаметр за ГОСТ визначають у відповідності з формулою

$$d_m = \frac{1}{\sqrt{m}}, \text{ а якщо представити } d_m \text{ через } a, \text{ то } d_m = \frac{1}{\sqrt{1/a}} = \sqrt{a}.$$

Якщо на довільній площині  $S$  кількість підрахованих зерен дорівнює  $n$ , то середню площу зерен можна знайти із співвідношення

$$a_s = \frac{S}{n},$$

або шляхом вимірювання площі кожного окремого зерна і розрахунку її середнього значення, що дає практично однакові результати.

Зроблений раніше висновок, що діаметр плоского зерна-багатокутника коректно визначати як діаметр рівновеликого зерну кола, рівною мірою стосується і співвідношення середньої площі сукупності плоских зерен  $a_s$  і їх середнього діаметра  $d_s$ , тоді

$$d_s = \sqrt{\frac{4a_s}{\pi}} = 1,1287\sqrt{a_s}.$$

Як видно,  $d_s$  в 1,1287 рази більше за  $d_m$ , який визначають за ГОСТ 5639-82, тобто відмінність між ними складає майже 13 %, при цьому, як було показано вище, саме  $d_s$  є об'єктивною геометричною характеристикою лінійних розмірів плоского зерна.

Таким чином, виконаний аналіз показав, що в стереологічних дослідженнях зеренної структури діаметром тривимірного зерна слід вважати діаметр рівновеликої сфери, а діаметром окремого плоского зерна – діаметр рівновеликого плоскому зерну кола, або середню довжину хорд, проведених через центр ваги зерна. При визначенні середньої величини зерен за ГОСТ 5639-82 слід брати до уваги, що середній діаметр  $d_m$  в 1,1287 рази менший за реальний діаметр  $d_s$ , який визначають з чітких геометричних співвідношень розмірних характеристик плоского зерна і рівновеликого йому кола.

## Література

1. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 22 с.
2. ISO 643:2003. Steels. Micrographic determination of the apparent grain size. – ISO, 2004. – 40 p.
3. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1976. – 375 с.
4. Даніленко Т.П. Застосування стереології до аналізу металевих зеренних структур // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 35 – 42.
5. Даніленко Т.П. Визначення параметрів об'ємної зеренної структури металевих матеріалів // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 1. – С. 38 – 47.
6. Выгодский М.Я. Справочник по элементарной математике. – М.: Наука, 1986. – 320 с.
7. Hull F.C., Nauk W.J. // J. Metals. – 1953. – 197. – P. 565 – 572.
8. Смирнова И., Смирнов В. Правильные, полуправильные и звездочные многогранники. – М.: МЦНМО, 2010. – 136 с.

Одержано 26.12.13

Т. П. Даниленко

**Анализ понятий величины и диаметра зерна в исследовании  
металлических структур**

**Резюме**

Показано, что определение в соответствии с основными стандартами величины зерна в металлических структурах как средней величины сечений трехмерных зерен в плоскости металлографического шлифа, является недостаточным для стереологических исследований полидисперсных зеренных структур, которые предусматривают измерения размеров отдельных зерен. Показано, что поскольку объективной мерой величины отдельного плоского сечения зерна-полиэдра является его площадь, то диаметром плоского зерна может быть как диаметр равновеликого этому зерну круга, так и средняя длина хорд, проведенных через центр тяжести плоского зерна.

T. P. Danilenko

**Analysis of the grain value and grain diameter  
in the study of the metallic structures**

**Summary**

It is shown that in accordance based on the standards for the definition of grain size in metal structures as an average of three-dimensional cross-sections of grains on the plane of the metallographic sample is insufficient for stereological research of the polydisperse grain structures that involve the measurement of individual grains. It is shown that as an objective measure of the value of a separate grain plane section is an area, the plane section diameter can be either the equally circle diameter or the average length of chords, conducting through the gravity center of a plane grain.

***Шановні колеги!***

**Тривас передплата на науково-технічний журнал  
«Металознавство та обробка металів» на 2014 р.**

Для регулярного одержання журналу потрібно перерахувати вартість заказаних номерів на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України. Вартість одного номера журналу – 30 грн., передплата на рік – 120 грн.

Ціна архівних номерів 1995 – 2013 рр. – 10 грн.

**Розрахунковий рахунок для передплатників,  
спонсорів і рекламодавців:**

*банк ГУДКСУ в м. Києві, р/р 31257201112215, код банку 820019.*

*Отримувач – ФТІМС НАН України, ЗКПО 05417153,*

*з посиланням на журнал “ММ”.*

Копію документа передплати та відомості про передплатника  
**просимо надсилати до редакції,**  
вказавши номер і дату платіжного документа.