

Т. П. Даніленко

ВСТАНОВЛЕННЯ УМОВ ОТРИМАННЯ ВИХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ ФОРМИ ЗЕРЕН В АУСТЕНІТНИХ СТРУКТУРАХ

Для стереологічної реконструкції розподілу розмірів зерен в аустенітних структурах необхідно враховувати геометричну форму зерен. Для цього запропоновано застосовувати коефіцієнти форми, які розраховують на основі визначення розподілу довжин хорд, отриманих у результаті нанесення на зображення плоских зерен січних ліній. Представлено результати експериментального встановлення необхідного статистичного масиву хорд і умов їх отримання.

Для стереологической реконструкции распределения размеров зерен в аустенитных структурах необходимо учитывать геометрическую форму зерен. Для этого предложено использовать коэффициенты формы, которые рассчитывают на основе определения распределения длин хорд, полученных в результате нанесения на изображения плоских зерен секущих линий. Представлены результаты экспериментального установления необходимого статистического массива хорд и условий их получения.

For stereological reconstruction of the grain size distribution in austenitic structures necessary to consider the geometric shape of the grains. For this purpose it is proposed to use the coefficients of the shape, which are calculated on the basis of the determination of the distribution of chord lengths obtained by drawing on a plane image of the grains intercept lines. The results of experimental definition of the necessary statistical array chords and conditions to obtain them is presented.

Ключові слова: форма структурних складових, коефіцієнти форми зерен, металева зеренна структура, стереологічна реконструкція розподілу розмірів

Одним із напрямів дослідження полідисперсних зеренних структур металів є встановлення розподілу цих зерен за розмірами з подальшим визначенням необхідних характеристик – середнього розміру зерен, їх кількості в одиниці об'єму, характеристик однорідності структури тощо.

В роботах [1 – 6] подано стереологічний метод реконструкції розподілу діаметрів тривимірних структурних складових (3-D структури) непрозорих матеріалів, тобто розподілу, який показує скільки складових і якого розміру присутне в структурі.

© Даніленко Т.П., 2014

Відповідно до методу обирають певну розмірну шкалу і розраховують у відносних частках розподіл діаметрів тривимірних об'єктів $P(D_k)$, використовуючи як вихідну інформацію розподіл діаметрів їх плоских перерізів $P_i(d)$, які можна спостерігати, наприклад, на металографічному шліфі, або розподіл хорд $P_i(l)$, отриманих на структурних елементах в результаті нанесення на плоске зображення структури січних ліній. Метод може бути застосований до будь-яких складових сферичної, поліедричної, еліпсоїдної та подібних їм форм, в тому числі до зерених металевих структур, вторинних та інтерметалевих фаз, до неметалевих включень, графітної і цементитної фаз, складових у бетонах, гранітах, композитних матеріалах тощо.

При цьому згідно з методом для кожного виду несферичних складових необхідно встановити показники їхніх форм, названі коефіцієнтами форми, які визначають для кожного i -го розмірного інтервалу.

Метою даного дослідження було встановлення умов отримання статистично достатнього масиву хорд, необхідних для визначення коефіцієнтів форми зерен аустенітних структур.

Згідно з методом [5], якщо вихідною інформацією є розподіл хорд $P_i(l)$, то коефіцієнти форми розраховують для кожного розмірного інтервалу як відношення відносної частки хорд, отриманих для цього інтервалу на плоскому перерізі зерна середньостатистичної форми, до відносної частки хорд від кола в цьому ж розмірному інтервалі, тобто за формулою:

$$\beta_i = P_i(l)_{\text{плоского зерна}} / P_i(l)_{\text{кола}}. \quad (1)$$

Якщо вихідною інформацією є розподіл діаметрів плоских перерізів $P_i(d)$ тривимірних зерен, назвемо їх плоскими зернами, то коефіцієнти форми розраховують для кожного розмірного інтервалу як відношення відносної частки діаметрів плоских зерен, отриманих для цього інтервалу від тривимірного зерна середньостатистичної форми, до відносної частки діаметрів кіл від сфери в цьому ж розмірному інтервалі, тобто за формулою:

$$\alpha_i = P_i(d)_{\text{зерна}} / P_i(d)_{\text{сфери}}. \quad (2)$$

При цьому зрозуміло, що $P_i(l)_{\text{кола}} = P_i(d)_{\text{сфери}}$ і їх розраховували, виходячи з простих геометричних співвідношень [3], за формулою:

$$P_i(l)_{\text{кіла}} = \frac{\sqrt{d_k^2 - l_{i-1}^2} - \sqrt{d_k^2 - l_i^2}}{d_k}. \quad (3)$$

Складові формул (1) і (2) $P_i(l)_{\text{плоского зерна}}$ і $P_i(d)_{\text{зерна}}$ треба встановити експериментально. Очевидно, що ці розподіли повинні бути визначені як середньостатистичні для аустенітних структур, тобто встановлені на певній групі зерен найбільш характерних форм.

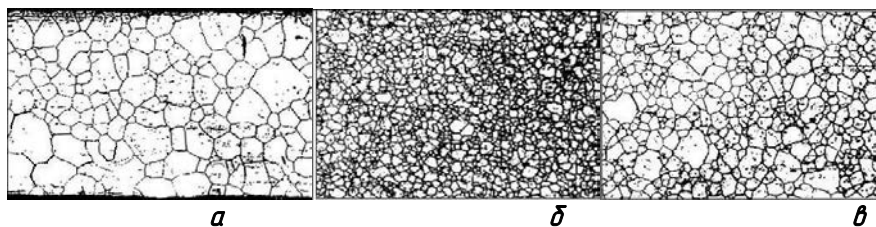


Рис. 1. Типова структура аустенітної високолегованої сталі:
a – крупнозерниста; **б** – дрібнозерниста; **в** – різнозерниста

Для визначення характерних форм зерен були розглянуті різні варіанти плоских структур в аустенітних сталях: крупнозерниста, дрібнозерниста, різнозерниста (рис. 1). Встановлено, що незважаючи на різноманіття форм плоских зерен, їх можна поділити на дві основні групи: 1) плоскі зерна рівноосні; 2) плоскі зерна дещо витягнуті в одному напрямку. Була візуально проаналізована форма близько 3000 плоских зерен у структурах і встановлено, що співвідношення кількості зерен рівноосних до витягнутих становить приблизно (8:10).

Саме в такому співвідношенні були обрані для дослідження плоскі зерна найбільш характерних форм. Усього досліджено 40 зерен в структурах із середньою величиною зерна, оціненою візуально за ГОСТ 5639-82 номером $G\ 6...5$. З них 20 зерен склали зерна максимальних розмірів, присутніх у структурах (рис. 2; а, б) їм надані номери №№1...20, і 20 зерен середніх і дрібних розмірів склали другу групу №№21...40 (рис. 2, в, г)

Така вибірка зерен повинна була достатньо представити форми зерен аустенітних структур: плоскі зерна максимальних розмірів, які спостерігалися в структурі – це, наймовірніше, максимальні плоскі перерізи тих конкретних зерен, від яких вони отримані, а зерна середніх і дрібних розмірів – це або перерізи менших розмірів від крупних зерен, або це теж могли бути максимальні перерізи, але вже від дрібніших об'ємних зерен.

Форма плоских зерен у двох названих групах дещо відрізняється, про що свідчить і візуальний їх аналіз і кількість сторін в обох групах зерен. Так, кількість сторін крупних зерен № 1...20 становить 8...14, а середня їх кількість для цих 20-ти зерен – 9,75. Кількість сторін для зерен другої групи № 21...40 становить 4...8 і середнє значення кількості сторін для цих 20-ти зерен становить 5,9 – тобто значно менше, ніж для групи з великих плоских зерен.

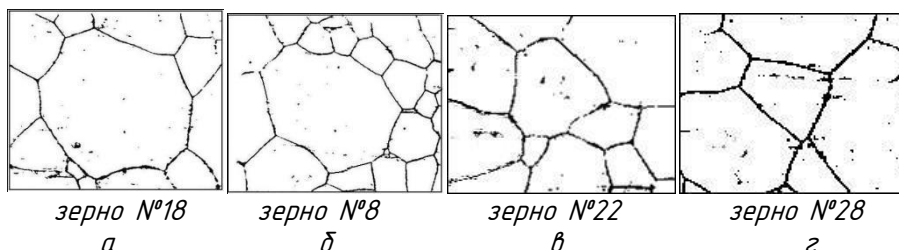


Рис. 2. Характерні форми максимальних (а; б) і не максимальних (в; г) плоских зерен аустеніту (по центру кожного зображення), для яких встановлювали розподіл хорд $P(l)$

Послідовність визначення розподілу хорд повинна складатися з нанесення з рівномірною щільністю січних ліній на плоскі зерна; вимірювання довжин хорд, отриманих в результаті пересічення цих ліній з границями зерен; розподілу цих хорд за розмірами по кожному зерну; визначення середньо-статистичного розподілу хорд для сорока обраних для аналізу зерен (їх приклади на рис. 2), тобто отримання $P_i(l)_{\text{плоского зерна}}$, за яким треба далі розрахувати коефіцієнти форми β_i .

Що стосується знаходження коефіцієнтів α_i , то, як було показано в роботах [1; 7], розподіл хорд, встановлений на максимальному плоскому перерізі тривимірного зерна, можна вважати таким, що дорівнює розподілу діаметрів плоских перерізів від цього зерна $P_i(d)_{\text{зерна}}$. Тому середньо-статистичний розподіл хорд, встановлений за вище наведеною послідовністю на 20-ти плоских зернах макси-

мальних розмірів №1...20, присутніх у структурах (їх приклади на *рис. 2, а, б*) слід вважати таким, що визначає розподіл діаметрів $P_i(d)_{\text{зерна}}$ і його слід застосовувати для розрахунку коефіцієнтів α_i за формулою (2).

Очевидно, що при встановленні статистичного масиву хорд, необхідних для розрахунку коефіцієнтів форми зерен, на зображення кожного зерна слід наносити серії паралельних січних ліній з рівним кутом між напрямками сусідніх серій. Це повинно невілювати вплив на результат випадковості розташування січних. У зв'язку з цим треба було вирішити питання: 1) якою повинна бути кількість напрямків нанесених на зерно січних ліній; 2) яку кількість хорд слід отримувати від одного зерна.

Для вирішення поставлених питань з групи крупних зерен були обрані зерна № 18 і № 8, а з другої групи – зерна № 22 і № 28 (див. *рис. 2*). Очевидно, що кількість напрямків нанесених на зерно січних ліній менше 6-ти, тобто при куті між групами січних більше 30° , не дасть достатньої інформації про розподіл хорд. В той же час у роботі [8] на прикладі п'ятикутника, як моделі плоского зерна, було показано достатність нанесення восьми груп паралельних січних з кутом між ними $22,5^\circ$.

В даному дослідженні спочатку більш докладні дослідження були проведені на зернах № 22 і № 28, на які у відповідності до [5] були нанесені 16 груп паралельних січних ліній, напрямки яких показані на *рис. 3*. Для встановлення достатньої для аналізу кількості хорд відстань між паралельними лініями однієї групи становила 0,25 і 0,5 мм.

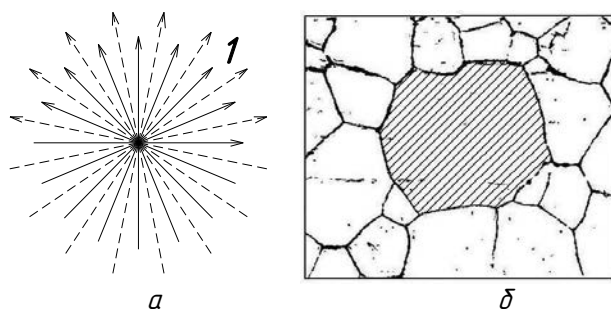


Рис. 3. Напрямки нанесення на зерна паралельних січних ліній (а) і зерно з хордами (б), отриманими в результаті нанесення січних напрямку 1

Нанесення січних ліній і вимірювання хорд здійснювали в комп'ютерній програмі «Компас».

Для встановлення впливу кількості напрямків паралельних січних отримані хорди поділили на групи, названі серіями, ознаками яких були напрямки січних і відстані між січними:

- серія I – напрямки, позначені на *рис.3* суцільними лініями; відстань між лініями 0,25 мм; хорди цієї серії поділені ще на дві серії: Ia і Ib, в яких відстань між січними була 0,5 мм;
- серія II – напрямки, позначені на *рис. 3* пунктирними лініями; відстань між лініями 0,25 мм; ця серія поділена теж на дві серії: Pa і Pb, в яких відстань між січними була 0,5 мм.

Тобто в кожній з серій Ia і Ib, а також IIa і IIб кількість хорд має бути приблизно у два рази меншою, ніж у серіях I і II, відповідно.

Для кожного зерна встановили максимальну хорду, розташували зерно таким чином, щоб ця максимальна хорда мала вертикальний напрямок і це положення зерна вважали вихідним. Далі змінювали орієнтацію зерна відносно вихідного положення послідовно на 11,25; 22,5; 33,75; ...; 157,5; 168,75 градусів, і потім на зерно в обраних 16-ти положеннях наносили січні лінії і заміряли довжини отриманих хорд, які розподіляли за розмірами, тобто знаходили $P_i(l)$. Для розподілу хорд застосували дві рівномірні розмірні шкали з 20-ти і 10-ти інтервалів, представлених в умовних одиницях довжини (ум. од.), що дозволило співставляти розподіли від зерен різної величини, приймаючи максимальну хорду від кожного конкретного зерна такою, що дорівнює 1 ум. од.

Отримані розподіли довжин хорд представлені на рис. 4 і 5 в шкалах з 20-ти і 10-ти розмірних інтервалів.

В шкалі з 20-ти інтервалів за найдостовірніший слід вважати розподіли, отримані на найбільшій кількості заміряних хорд, а саме: розподіл з 802 хорд для зерна № 22 (див. рис. 4, з) і з 563 хорд для зерна № 28 (див. рис. 5, з). Це розподіли, які включають хорди, отримані на 16-ти напрямках нанесення січних і при найменшій відстані між паралельними січними в 0,25 мм. До них досить наближеними є розподіли, отримані також на 16-ти напрямках, але з більшою відстанню між січними – 0,5 мм (див. рис. 4, ж; рис. 5, ж), але в більшому ступені наближені ті варіанти, що отримані на 8-ми напрямках з відстанню між січними в 0,25 мм (див. рис. 4, в, е; рис. 5, в, е). Тобто, в дослідженнях достатньо обмежуватися січними 8-ми напрямків з меншою відстанню між ними, або наносити січні 16-ти напрямків з більшою відстанню між ними, що дозволяє отримувати приблизно 300...400 хорд. Подальше збільшення статистичного масиву хорд суттєво не впливає на результат їх розподілу за розмірами.

В шкалі з 10-ти інтервалів оптимальним є застосування 8-ми напрямків нанесення січних з відстанню між ними в 0,25 мм і отриманням для аналізу близько 300...400 хорд, розподіл цих хорд майже співпадає з розподілом, встановленим для 16-ти напрямків з тією ж відстанню в 0,25 мм і кількістю хорд 802 і 563 ум. (рис. 4, и; рис. 5, и) для зерен №№ 22 і 28, відповідно.

Оскільки на зернах №№ 22 і 28 була встановлена достатність використання 8-ми напрямків нанесення паралельних січних ліній, саме така їх кількість була застосована до аналізу двох крупних зерен №№ 8 і 18.

Цю частину досліджень виконали таким чином. На зерна № 18 і № 8 спочатку наносили січні лінії з відстанню між ними 2 мм (серія I), а потім наносили другу групу січних (серія II), при цьому кожна січна другої серії займала середнє положення між двома лініями першої групи. А сумісна сукупність отриманих хорд по обох серіях січних відповідає умові розташування сусідніх січних ліній на відстані 1 мм. Результати розподілення отриманих хорд за розмірами, тобто $P_i(l)$, для хорд серій I і II, а також сумісного по цих двох серіях представлені на рис. 6.

Застосована відстань між січними 1 мм дозволила отримати хорди у достатній кількості – 561 ум. на зерні № 8 і 663 ум. на зерні № 18 (див. рис. 6; в; е). Разом з тим кількість хорд навіть у ~300 ум. приблизно відображає характер розподілу (див. рис. 6; а, б; з, д), але більш достовірним для крупних зерен є розподіл з не менш ніж 500 хорд.

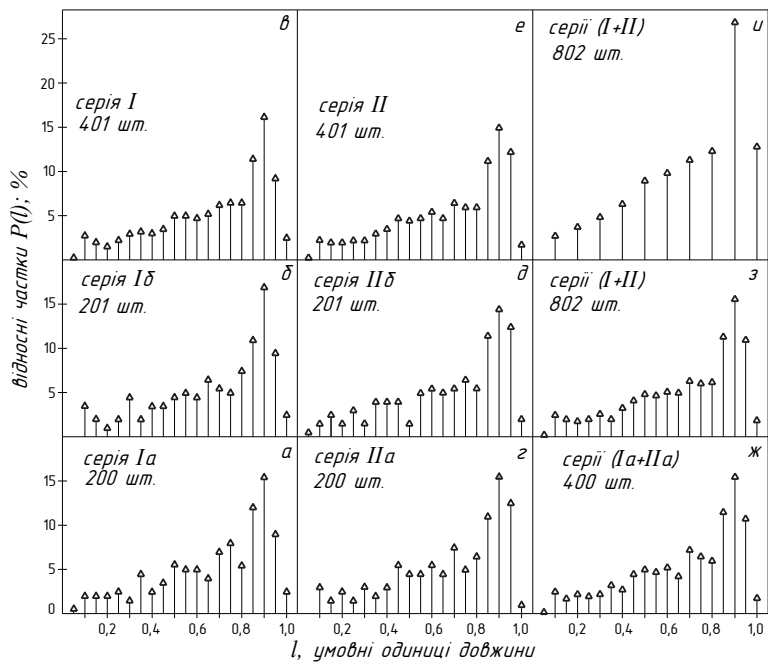


Рис. 4. Розподіли хорд $P(l)$, встановлені для зерна № 22

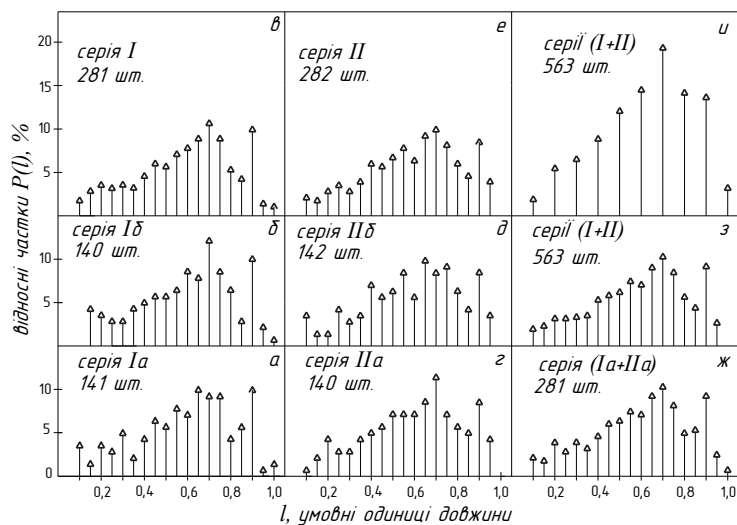


Рис. 5. Розподіли хорд $P(l)$, встановлені для зерна № 28

Таким чином, виконані дослідження встановили умови отримання вихідної інформації для розрахунку коефіцієнтів форми зерен в аустенітних структурах, а саме достатність нанесення на плоскі зерна паралельних січних ліній 8-ми напрямків з відстанню між січними, яка дозволяє отримувати не менше 300 хорд на зернах малих розмірів і не менше 500 хорд на зернах максимальних розмірів, присутніх в структурі.

Застосований алгоритм встановлення умов отримання вихідної інформації може бути застосований і до стереологічного аналізу інших структурних складових в металевих і неметалевих матеріалах.

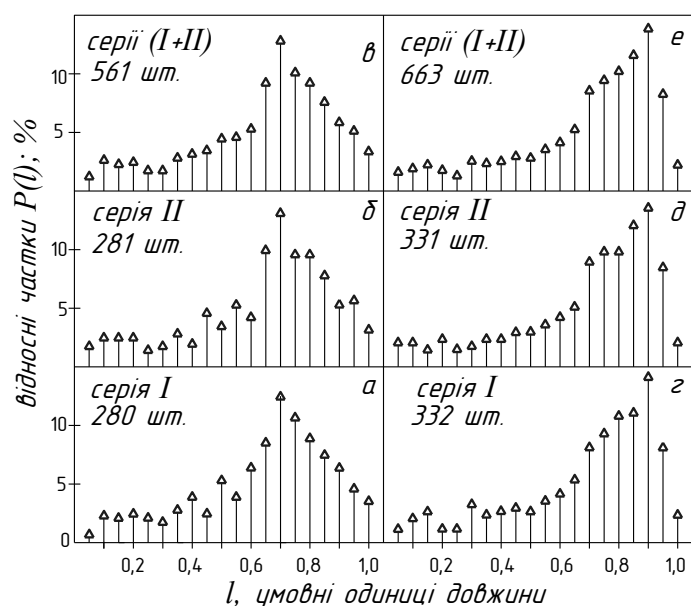


Рис. 6. Розподіли хорд $P(l)$, встановлені для зерен № 8 (а, б, в) і № 18 (з, д, е)

ЛІТЕРАТУРА

1. Даниленко Т.П. Оптимизация режимов термической обработки на основе разработки нового метода определения параметров пространственной зеренной структуры: дис. канд. техн. наук / – Днепропетровск: ДМети, 1988. – 227 с.
2. Danilenko T. Proc. 1-st Int. Conf. “Development, Testing and Application of Materials”. – Croatia, 1996. – P. 89 – 95.
3. Даниленко Т.П. Стереологічна реконструкція і математичне моделювання тривимірних структур // Збірник наукових праць ДЕГУТ. – Серія: Транспортні системи і технології. – К.: ДЕГУТ. – Вип. 16. – 2010. – С.100 – 109.
4. Даниленко Т.П. Застосування стереології до аналізу металевих зеренних структур // Металознавство та обробка металів. – 2010. – № 3. – С. 35 – 42.
5. Патент на винахід № 97453 Україна. Спосіб визначення основних параметрів об'ємної структури металевих матеріалів / Т.П.Даниленко, Е.І.Даниленко // Бюл. «Промислова власність». – 2012. – № 3.
6. Даниленко Т.П. Визначення параметрів об'ємної зеренної структури металевих матеріалів // Металознавство та обробка металів. – 2013. – № 1. – С. 38 – 47.
7. А.с. 1397832 СССР. Способ определения распределения размеров плоских сечений зерна металлографических образцов / Е.Я. Лезинская, Т.П. Даниленко // Бюл. изобретений. – 1988. – № 19.
8. Даниленко Т.П. Урахування форми структурних складових у стереологічному аналізі // Збірник наукових праць ДЕГУТ. Серія: Транспортні системи і технології. – К.: ДЕГУТ. – Вип. 22. – 2013. – С. 20 – 27.