

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.54.32.432

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-13>

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ У СТАЛЕВІЙ ПРОДУКЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ СТЕРЕОЛОГІЧНОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ

Єфімова Вероніка Гаріївна,

кандидат технічних наук, доцент

доцент кафедри фізичної хімії

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ORCID ID: 0000-0003-2372-8398

Смірнов Юрій Олексійович,

кандидат економічних наук, доцент

Фізико-технологічного інституту металів та сплавів

Національної академії наук України

ORCID ID: 0009-0009-0479-5828

Малій Олександр Геннадійович,

викладач циклової комісії з автоматизації металургійного

виробництва та механічного обладнання

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0009-0009-1352-3867

Грудкіна Наталія Сергіївна,

доктор технічних наук, доцент,

професор кафедри природничо-наукових та загальноінженерних дисциплін

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-0914-8875

У роботі показано, що неметалічні включення, які утворюються в процесі виробництва сталі, значно впливають на властивості сталі та металопродукції і їх видалення в процесах виробництва сталі, що відіграє головну роль при отриманні продукції високої якості.

Доведено, що для отримання кількісної інформації про розмір та кількість неметалевих включень можна використовувати стереологічний аналіз.

Висвітлено, що «чиста сталь» включає управління вмістом усіх включень, що містяться в сталі, з урахуванням включень, більших, ніж критичний розмір, який відбивається на якості готової продукції.

Показано, що неметалеві сталі в готовому продукті представлені оксидами, при цьому на сьогоднішній день оцінка забрудненості сталі є недостатньою і в окремих випадках має умовний характер.

Установлено, що жодна з чинних шкал, а саме ASTM E45, ISO 4967:1979, SKF та інші, не відображають цілком реального ступеня забрудненості сталі. При цьому дані хімічного аналізу досліджуваних зразків свідчать, що вміст неметалевих включень перевищує на 20–30 % дані, отримані за допомогою використання стандартних металографічних методик.

Висвітлено, що нині велике поширення серед кількісних методів аналізу набули статистичні методи оцінки розмірів та розподілу включень.

Показано, що для всебічної оцінки забрудненості сталі неметалевими включеннями необхідно проводити комплексний аналіз, що містить оцінку їх складу, морфології, розмірів та розподілу.

Показано, що для статистичної оцінки розподілу неметалевих включень за розмірами в роботі розроблено методiku, що дає змогу виявляти розподіл великих неметалевих включень у сталій продукції.

З'ясовано, що для виявлення крупних неметалевих включень можна застосовувати логарифмічно нормальний (логнормальний) розподіл еквівалентних діаметрів неметалевих включень, в основі якого лежить мультиплікативний процес формування випадкових величин.

Показано, що для отримання кривої розподілу вся виявлена сукупність неметалевих включень (окремо для сульфідів та оксидів) ділилася за розмірами інтервали, при цьому результати аналізу значно залежали від кількості інтервалів, тобто розмірних груп.

Показано, що з використанням розробленої методики проведено кількісну оцінку забрудненості безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями.

Показано, що в результаті проведених досліджень розроблено методику стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень, що визначає невраховані неметалеві включення розміру, що перевищує критичний.

З'ясовано з проведенням кількісної оцінки забруднення безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями з використанням методики стереологічної реконструкції логнормального розподілу включень за розмірами дає змогу прогнозувати кількість великих неметалевих включень у металевій продукції.

Ключові слова: неметалеві включення, логнормальний розподіл, стереологічна реконструкція, безперервнолиті заготовки.

Yefimova Veronika, Smirnov Yuri, Malii Oleksandr, Hrudkina Nataliia. Assessment of the distribution of non-metallic inclusions in steel products using the stereological reconstruction method

The work shows that non-metallic inclusions formed in the steel production process significantly affect the properties of steel and metal products, and their removal in steel production processes plays a major role in obtaining high-quality products.

It is proven that stereological analysis can be used to obtain quantitative information about the size and number of non-metallic inclusions.

It is highlighted that "clean steel" includes controlling the content of all inclusions contained in steel, taking into account inclusions larger than the critical size, which affects the quality of the finished product.

It is shown that non-metallic steels in the finished product are represented by oxides, while today the assessment of steel contamination is insufficient and in some cases is conditional.

It is established that none of the current scales, namely ASTM E45, ISO 4967:1979, SKF and others, do not fully reflect the real degree of steel contamination [1]. At the same time, the data of chemical analysis of the studied samples indicate that the content of non-metallic inclusions exceeds by 20-30% the data obtained using standard metallographic methods.

It is highlighted that at present, statistical methods for estimating the size and distribution of inclusions have become widespread among quantitative methods of analysis.

It is shown that for a comprehensive assessment of the contamination of steel with non-metallic inclusions, it is necessary to conduct a complex analysis, which includes an assessment of their composition, morphology, size and distribution.

It is shown that for the statistical assessment of the distribution of non-metallic inclusions by size, a method was developed in the work that allows detecting the distribution of large non-metallic inclusions in steel products.

It was found that for the detection of large non-metallic inclusions, a logarithmically normal (lognormal) distribution of equivalent diameters of non-metallic inclusions can be used, which is based on the multiplicative process of forming random variables.

It is shown that to obtain a distribution curve, the entire detected set of non-metallic inclusions (separately for sulfides and oxides) was divided by size intervals, while the analysis results largely depended on the number of intervals, i.e. size groups.

It is shown that using the developed methodology, a quantitative assessment of the contamination of continuously cast billets with non-metallic inclusions was carried out.

It is shown that as a result of the research, a method of stereological reconstruction of the distribution of non-metallic inclusions was developed, which determines unaccounted non-metallic inclusions of a size exceeding the critical one.

It was found that quantitative assessment of the contamination of continuously cast billets with non-metallic inclusions using the method of stereological reconstruction of the lognormal distribution of inclusions by size allows predicting the number of large non-metallic inclusions in metal products.

Key words: non-metallic inclusions, lognormal distribution, stereological reconstruction, continuously cast billets.

Вступ. Головним завданням металургів є видалення неметалевих включень, а також контроль природи й розподілу включень, що залишилися в сталі. Стереологічний аналіз включень у металі може бути використаний для отримання кількісної інформації про їх розмір та кількість.

Так, за даними роботи [1], один кілограм сталі LCAK містить 10^7 – 10^9 включень, зокрема близько 400 розміром 80–130 мкм, десять – 130–200 мкм

і одне-два включення розміром – 200–270 мкм і більше [2; 3]. Дослідження [4] показують, що вміст дрібних включень за кількістю переважає кількість великих, проте повний уміст останніх може бути більшим [5].

Серед металографічних методів одним із поширених методів у практиці заводських лабораторій отримав метод порівняння зі стандартними шкалами, що дає змогу досить швидко оцінити забрудненість сталі неметалевими

включеннями в балах шкали того чи іншої стандарту.

Джерелом інформації про параметри тривимірної структури є двовимірна (площинна) структура перерізу сплаву, що спостерігається на площині шліфу. У цьому елементи просторової структури представлені їх слідами, а мікро-частинка – її перетином.

Так, для всебічної оцінки забрудненості сталі неметалевими включеннями необхідно проводити комплексний аналіз, що містить оцінку їх складу, морфології, розмірів та розподілу. Для статистичної оцінки розподілу неметалевих включень за розмірами нами розроблено методику, що дає змогу зрештою імітувати розподіл великих включень.

Методи та методики дослідження. Мета досліджень:

1) розробити методику стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень, що визначає невраховані неметалеві включення розміру, що перевищує критичний;

2) провести кількісну оцінку забруднення безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями з використанням методики стереологічної реконструкції логнормального розподілу включень за розмірами.

Коли зразок сталі, що містить неметалеві включення, перетинає площину, більшість частинок проходить не через максимальний діаметр, тому видима частина включень має менші розміри (Рис. 1). Отже, вимірювання розміру частинок неметалевих включень, що містяться, матимуть деякий перекид у бік менших розмірів.

Тим часом певним недоліком відомих статистичних методів оцінки забрудненості сталі вважається той факт, що розподіл включень будується тільки на підставі візуального підрахунку включень [7]. Тому кількість певних неметалевих включень буде на 20–30 % нижчою, ніж є насправді.

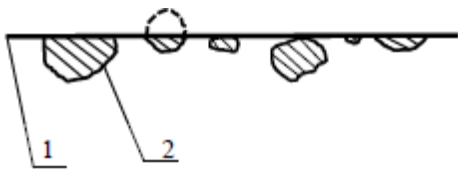


Рис. 1. Число і розміри неметалевих включень на зрізі шліфу

Отже, в кінцевому підсумку одержувана статистична крива розподілу несе інформацію переважно про видиму частину включень.

За даними робіт [8], відомо, що досить достовірно можна вважати гіпотезу про

логарифмічно нормальний (логнормальний) розподіл еквівалентних діаметрів неметалевих включень. В основі логнормального розподілу лежить мультиплікативний процес формування випадкових величин, тобто процес, у якому дія кожного додаткового чинника на випадкову величину пропорційна досягнутому рівню [9; 10]. Функція густини логнормального розподілу описується виразом:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln x} \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

де μ та $\ln x$ – відповідно середнє арифметичне значення та середньоквадратичне відхилення логарифмів.

При цьому кінцева інформація про чистоту сталі подається у вигляді кривої розподілу еквівалентних діаметрів неметалевих включень, отриманих на підставі статистичної оцінки.

У роботі оцінка забрудненості проводилася на оптичному металографічному мікроскопі Neophot зі збільшенням $\times 300$. Оцінюючи забрудненість шліфу діаметром 10 мм, підрахунок неметалевих включень проводився дільниці розміром 4×4 мм. Досліджуване поле становило 5 % площі поверхні шліфу. Вибір досліджуваного поля зумовлений необхідністю фіксувати як дрібні, а й більші включення, з метою забезпечення об'єктивності аналізу. Зазначена площа набирається 64 мікрофотографія 500×500 мкм. Далі з використанням аналізатора зображення Thixomet PRO необхідна площа, що відповідає розміру поля зору, видимого в окуляри мікроскопа при збільшенні $\times 100$, збиралася послідовним прецизійним склейкою «на льоту» суміжних полів зору. Так, отримано панорамне зображення структури площі досліджуваного шліфу. Весь цикл вимірювань містив такі дії: виготовлення панорами ділянки шліфу; детектування включень; поділу включень за типами та розмірами.

Для отримання кривої розподілу вся виявлена сукупність неметалевих включень (окремо для сульфідів та оксидів) ділилася за розмірами інтервали. Результати аналізу значно залежали від кількості інтервалів, тобто розмірних груп, як встановлено в роботах [7; 8]. Верхня межа, як і середнє значення кожного наступного інтервалу, виходить множенням попереднього значення на коефіцієнт, рівний $\sqrt{2} = 1,41$ для розподілу еквівалентних діаметрів.

За отриманими емпіричними даними (Y_{zi}) визначають теоретичні частоти (Y_{Ti}) логнормального розподілу. При розрахунках використовують не центри інтервалів, (X_i), а їх верхні межі (X'_i) [8].

Перевірка відповідних вихідних емпіричних даних логнормальному закону розподілу здійснювалася за критеріями χ^2 , λ та медіанному критерію Me [10].

При розробці математичної моделі для отримання доповненої кривої логнормального розподілу розмірів неметалевих включень використовується така схема:

– усі значення частот відповідних еквівалентних діаметрів неметалевих включень зліва від максимального значення вихідної теоретичної кривої залишаються незмінними, оскільки ці включення досить легко фіксувати за допомогою оптичного мікроскопа;

– розширення починали з точки, що відповідає максимальній частоті включень за такою формулою:

$$Y'_j = Y_{\max} + z \cdot N_1, \quad (2)$$

– розширення низхідної частини кривої:

$$Y'_j = Y'_{j-1} + z \cdot N_i \quad (3)$$

– розширення висхідної частини вихідної кривої:

$$Y'_j = Y'_{j-1} - z \cdot N_i \quad (4)$$

де Y'_j – частота включень у доповненій кривій розподілу; $Y_{\max}$ – максимальна частота включень у вихідній теоретичній кривій розподілу; – крок розширення кривої; N_i – коефіцієнти розширення кривої, що вибирають відповідно до матриці $LN-A$ і $LN-G$.

З використанням розробленої методики нами проведено кількісну оцінку забрудненості безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями сталі марки 45 з використанням продування через кільцеву фурму й без неї. Метал розлитий без продування аргонем – дослідний, а із застосуванням продування – порівняльний. Під час аналізу враховували оксиди, що виділилися в самостійній фазі. Мінімальний діаметр виявлених при використанні мікроскопа включень оксидів дорівнює 2 мкм, а максимальний не перевищував 60–65 мкм. На рис. 2 а, б



а)

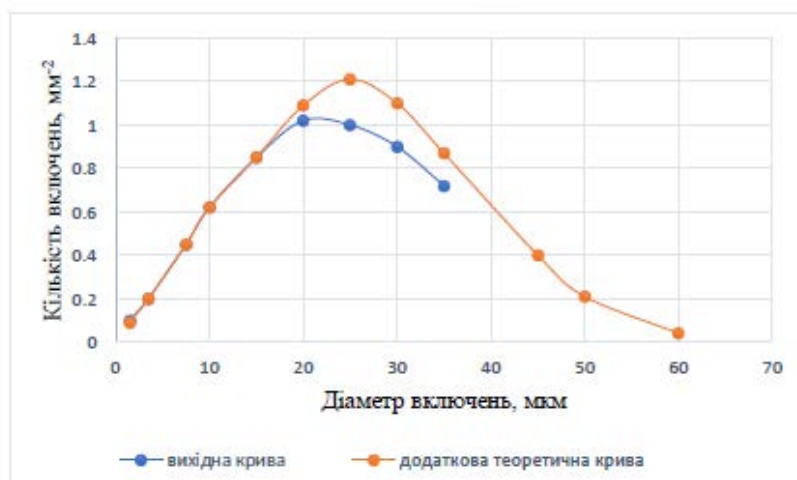


Рис. 2. Розподіл розмірів оксидів у зразках безперервнолитої заготовки:
а – порівняльний метал; б – дослідний метал

показані вихідні та доповнені розподілу розмірів оксидів.

Так, при використанні методики стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень виявлено, що неврахованими залишилися в середньому близько 40 % великих включень у порівняльному металі та 15 % у дослідному. Отримано залежності розподілу оксидів у відлитому металі рис. 4 а, б, дані яких свідчать, що цей метод дає змогу виявити великі включення, які виявляються традиційними металографічними методами. Із цих рис. 4 а, б, що в дослідному металі залишилися неврахованими в середньому близько 40 % великих включень, а в порівняльному – 15 %.

Висновки. У результаті проведених досліджень розроблено методику стереологічної реконструкції розподілу неметалевих включень, що визначає невраховані неметалеві включення розміру, що перевищує критичний.

Проведення кількісної оцінки забруднення безперервнолитих заготовок неметалевими включеннями з використанням методики стереологічної реконструкції логнормального розподілу включень за розмірами показало, що її використання дає змогу прогнозувати кількість великих неметалевих включень у металевій продукції.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Zhang L., Ren Y. Handbook of non-metallic inclusions in steel. 2025. Springer Singapore. Hardcover XIII, 816 p.
2. Zhang X., Wang Z., Wang W., Zhang H., Zhang L. Control of non-metallic inclusions and micro-structure of an Al-killed steel through adjusting titanium content. *Journal of materials research and technology*. 2025. Vol. 35. № 2. P. 5629–5636.
3. Weitao L., Fapu W., W. Guangfu, Huajun, W. Kaimin, J. Xingyu Haiyan characteristics and evolution of non-metallic snclusions in metallurgical production of GCr15 bearing steel. *Special steel*. 2025. Vol. 46. № 1. P. 79–86.
4. She C., Zhu L., Ren Y., Sun Y., Zhang L. Control of steel cleanliness and non-metallic inclusions in an Al-killed steel through CaO-Al₂O₃ powder injection during RH refining process. *Metallurgical research and technology*. 2025. Vol. 122. № 4. P. 342–354.
5. Zhao Y., Ren G., Chen L., Zhu J., Zhao A. Influence of non-metallic inclusions on very high-cycle fatigue performance of high-strength steels and interpretation via crystal plasticity finite element method. *Metals*. 2024. Vol. 14(8). № 6. P. 948–966.
6. Imashuku S. Three_dimensional imaging of non-metallic snclusions in steel using Ionoluminescence. *Metallurgical and materials transactions B*. 2024. Vol. 55. № 5. P. 2459–2466.
7. Lipinski T. Analysis of the Distribution of non-metallic inclusions and its impact on the fatigue strength parameters of carbon steel melted in an electric furnace. *Materials*. 2024. Vol. 17 (24). P. 6151–6169.
8. Muhammed S., Tao X., Ren D., Zhang H. Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling under static and dynamic conditions. *Archives of Advanced Engineering Science*. 2025. Vol. 00(00). P. 1–9.
9. Zavdoveev A., Zrodowski A., Cortes V., Choma V., Ostrysz T., Stasiuk M., Skoryk O., Skoryk M. Atomization of the Fe-rich MnNiCoCr high-entropy alloy for spherical powder production. *Materials Letters*. 2024. Vol. 363. P. 234–244.
10. Xu G., Liang S., Song B., Liu W., Yang S., Zhao L., Zhang Y. Influence of refining slag composition on nonmetallic inclusions in 38CrMoAl steel. *Journal of materials research and technology*. 2025. Vol. 34. № 1. P. 209–219.

REFERENCES:

1. Zhang, L., & Ren, Y. (2025). Handbook of non-metallic inclusions in steel. 2025. Springer Singapore. Hardcover XIII, 816p.
2. Zhang, X., Wang, Z., Wang, W., Zhang, H., & Zhang, L. (2025). Control of non-metallic inclusions and micro-structure of an Al-killed steel through adjusting titanium content. *Journal of materials research and technology*, 35(2), 5629–5636.
3. Weitao, L., Fapu, W., W. Guangfu, Huajun, W. Kaimin, J. Xingyu (2025). Haiyan characteristics and evolution of non-metallic snclusions in metallurgical production of GCr15 bearing steel. *Special steel*, 46(1), 79–86.
4. She, C., Zhu, L., Ren, Y., Sun, Y., & Zhang, L. (2025). Control of steel cleanliness and non-metallic inclusions in an Al-killed steel through CaO-Al₂O₃ powder injection during RH refining process. *Metallurgical research and technology*, 122(4), 342–354.

5. Zhao, Y., Ren, G., Chen, L., Zhu, J., & Zhao, A. (2024). Influence of non-metallic inclusions on very high-cycle fatigue performance of high-strength steels and interpretation via crystal plasticity finite element method. *Metals*, 14(8), № 6, 948–966.
6. Imashuku, S. (2024). Three-dimensional imaging of non-metallic inclusions in steel using Ionoluminescence. *Metallurgical and materials transactions B*, 55(5), 2459–2466.
7. Lipinski, T. (2024). Analysis of the Distribution of non-metallic inclusions and its impact on the fatigue strength parameters of carbon steel melted in an electric furnace. *Materials*, 17(24), 6151 – 6169.
8. Muhammed, S., Tao, X., Ren, D., & Zhang, H. (2025). Study on the separation process of non-metallic inclusions at the steel-slag interface using water modeling under static and dynamic conditions. *Archives of Advanced Engineering Science*, 00(00), 1–9.
9. Zavdoveev, A., Zrodowski, A., Cortes, V., Choma, V., Ostrysz, T., Stasiuk, M., Skoryk, O., & Skoryk, M. (2024). Atomization of the Fe-rich MnNiCoCr high-entropy alloy for spherical powder production. *Materials Letters*, 363, 234–244.
10. Xu G., Liang S., Song B., Liu W., Yang S., Zhao L., Zhang Y. (2025). Influence of refining slag composition on nonmetallic inclusions in 38CrMoAl steel. *Journal of materials research and technology*, 34(1), 209–219.



Стаття поширюється на умовах
ліцензії відкритого доступу
CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.12.2025
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026