

Вплив нормалізації на кількісні параметри мікроструктури конструкційної сталі

Афтанділянц Є. Г.¹, доктор технічних наук, професор, aftyev@yahoo.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5864-9855>

Квасницька Ю. Г.¹, доктор технічних наук, член-кореспондент
НАН України, завідувач відділу, jul.kvasnitskaja@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>

Вейс В. І.¹, доктор філософії, науковий співробітник, valentyneis@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8889-2303>

Степанова Т. В.¹, науковий співробітник, stept@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5489-9595>

Пархомчук Ж. В.¹, кандидат технічних наук, старший дослідник,
старший науковий співробітник, zhanna_parkhomchuk@ukr.net,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3026-8951>

Квасницька К. Г.², доктор філософії, доцент, katonish@gmail.com,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-9285>

¹Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

В статті розглянуто вплив нормалізації на такі основні кількісні параметри мікроструктури литої конструкційної сталі, як довжина, ширина, коефіцієнт форми, площа зерен та загальна площа зерен фериту та перліту. Показано можливості аналізу мікроструктури за допомогою комп'ютерної програми аналізу зображення, в порівнянні з дослідженням мікроструктури шляхом використання еталонних шкал. Встановлено, що після нормалізації від 865 °С довжина і ширина зерен фериту зменшується, відповідно, в 1,88 і 2,33 рази, коефіцієнт форми на 10-12 %, середня площа феритного зерна в 4,78-5,18 разів, а загальна площа фериту збільшується в 1,3-1,5 разів. Довжина і ширина зерен перліту зменшується, відповідно, в 2,21 і 2,01 рази, коефіцієнт форми на 3-12 %, середня площа перлітного зерна в 3,96-4,02 рази, а загальна площа перліту – на 2-15 %. Показано, що диспергування мікроструктури сталі відбувається внаслідок збільшення відсотку елементів структури, які мають менші розміри. Довжина і ширина зерен фериту в інтервалі значень від 10 до 20 мкм збільшується, відповідно, з 39 і 85 % для вихідного стану до 91 і 97 % після нормалізації, тобто в 2,3 рази і на 14 %. Коефіцієнт форми при значенні 2 збільшується на 8 %, а площа зерен фериту в інтервалі від 100 до 300 мкм² складає після нормалізації 94 %, що в 2,1 рази більше ніж в вихідному стані. Встановлено, що розподіл перліту в мікроструктурі литої сталі після нормалізації характеризується тим, що довжина і ширина зерен перліту, в інтервалі від 10 до 50 мкм, змінюється, відповідно, з 85 до 100 і з 95 до 100 % випадків, коефіцієнт форми у 99 % випадків в інтервалі 1-4. Значення середньої площі перлітного

зерна у литому стані у 98 % випадків знаходиться в інтервалі від 0 до 1750 мкм², а після нормалізації у 99 % випадків – від 0 до 1250 мкм². Показано, що загальна площа фериту в литому стані складає 100 % в інтервалі від 15 до 30 мкм², а після нормалізації від 15 до 45 мкм², а загальна площа перліту в аналогічному інтервалі змінюється, відповідно, з 75-90 мкм² до 60-90 мкм². Матеріали статті можуть бути використані науковцями для кількісного аналізу впливу зовнішніх факторів на мікроструктуру металів і сплавів.

Ключові слова: сталь, хімічний склад, нормалізація, кількісний аналіз, ферит, перліт, зерно, розмір, коефіцієнт форми.

Оцінка мікроструктури литих та нормалізованих конструкційних сталей проводиться, як правило, шляхом порівняння досліджуваних мікроструктур з еталонними структурами, які наведені у численних роботах, наприклад [1-3].

В результаті порівняння визначаються, наприклад, дисперсність пластинчастого та зернистого перліту, розміри голок мартенситу, нітриди, співвідношення фериту та перліту, зернистого та пластинчастого перліту, мартенситу, трооститу, число зерен, мінімальний, середній, максимальний діаметр зерна та інші кількісні параметри.

Однак аналіз мікроструктур шляхом порівняння з еталонними шкалами довготривалий, вимагає високої кваліфікації дослідників і не дає можливості кількісно оцінити параметри структури, наприклад коефіцієнт форми, які істотно впливають на властивості сталі. Останнім часом широкого поширення набуло дослідження та визначення кількісних параметрів структур за допомогою комп'ютерних програм аналізу зображення [4, 5].

Метою роботи є визначення кількісних параметрів мікроструктури конструкційної сталі в литому та нормалізованому стані та порівняння їх значень за допомогою комп'ютерної програми аналізу зображення.

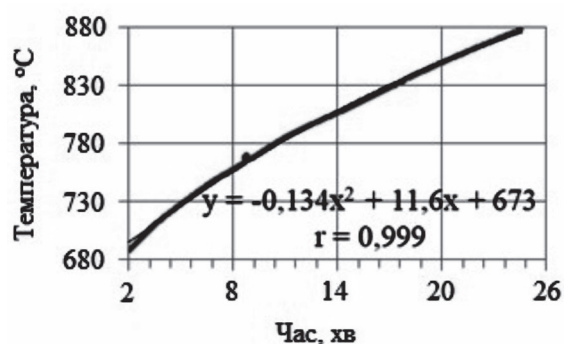
Заготовки дослідних зразків для аналізу мікроструктури вирізали з стінок виливків товщиною 10 мм та масою – 7 кг. Хімічний склад сталі виливків наступний (мас. частка, %): C = 0,415; Si = 0,399; Mn = 0,813; Al = 0,0748; Cr = 0,253; P = 0,0192; S = 0,0311.

Сталь виплавляли в індукційній електропечі ІСТ-0,16 з основною футеровкою з використанням сталевого і чавунного брукху, звороту власного виробництва та феросплавів. Розплав розливали у форми із газифікованими моделями.

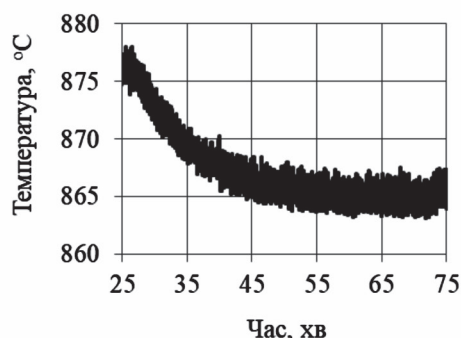
Температурно-часові режими нагрівання, витримки та охолодження зразків при нормалізації наведено на рис. 1.

Дослідження мікроструктури здійснювали на мікроскопі Epitip при збільшенні 100, 200 і 400 разів. Кількісні параметри структури (довжина (***l***) та ширина (***b***) зерен, площа фериту (S_{fer}), площа перліту (S_{per})) визначали за допомогою комп'ютерної програми аналізу зображення "ImageJ" [5].

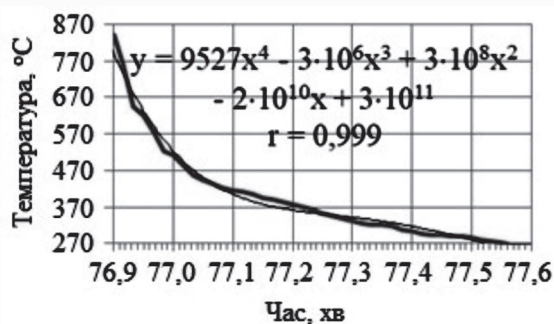
Визначали також коефіцієнт форми елементів структури як відношення довжини структурного елементу до його ширини ($K_f = l/b$). Коефіцієнт форми використовується для характеристики форми структурних складових при кількісній оцінці структури [6, 7]. В залежності від середнього значення коефіцієнта форми структурні складові кваліфікують, як ізометричні при $K_f < 1,3$, проміжні при $1,3 < K_f < 2,0$ і голчасті при $K_f > 2,0$ [8].



а



б

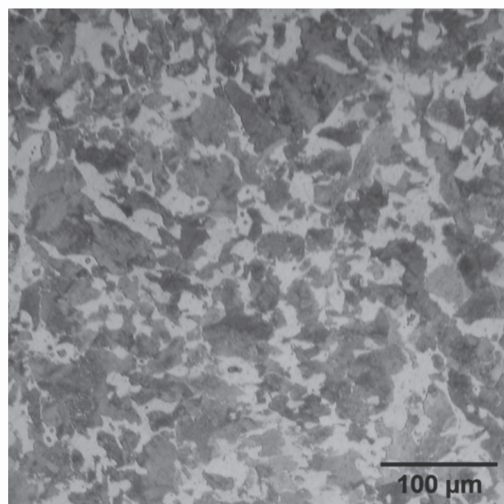


в

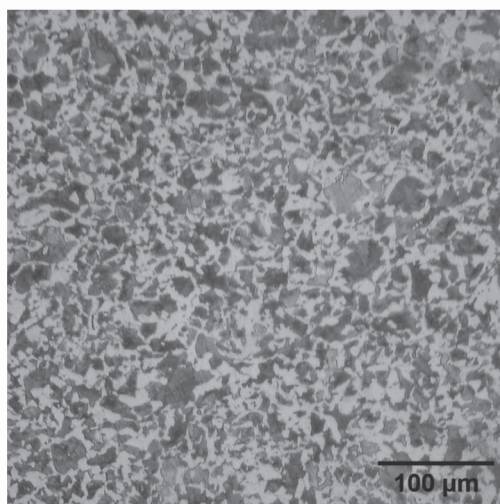
Рис. 1. Температурно-часові режими нагрівання (а), витримки (б) та охолодження (в) зразків при нормалізації.

Fig. 1. Temperature-time regimes for heating (a), holding (б), and cooling (в) of samples during normalization.

Типові мікроструктури зразків сталі в литому та нормалізованому стані наведені на рис. 2.



а



б

Рис. 2. Мікроструктура зразків сталі в литому (а) та нормалізованому (б) стані.

Fig. 2. Microstructure of steel samples in the as-cast (a) and normalized (б) conditions.

Результати кількісного аналізу мікроструктури на основі 6202 вимірів показують, що мікроструктура литої сталі після нормалізації змінюється наступним чином. Довжина і ширина зерен фериту зменшуються, відповідно, в 1,88 і 2,33 рази, коефіцієнт форми на 10-12 %, а середня площа феритного зерна в 4,78-5,18 разів. Загальна площа фериту збільшується в 1,3-1,5 разів. Довжина і ширина зерен перліту зменшується, відповідно, в 2,21 і 2,01 рази, коефіцієнт форми на 3-12 %, середня площа перлітного зерна в 3,96-4,02 рази, а загальна площа перліту – на 2-15 %.

Розподіл параметрів мікроструктури за їх значеннями наведено на рис. 3-5.

Аналіз даних наведених на рис. 3 показує, що після нормалізації від 865 °С диспергування мікроструктури сталі відбувається внаслідок того, що збільшується відсоток елементів структури, які мають менші розміри.

Наприклад, у випадку фериту довжина і ширина зерен в інтервалі значень від 10 до 20 мкм збільшується, відповідно, з 39 і 85 % для вихідного стану до 91 і 97 % після нормалізації, тобто в 2,3 рази і на 14 %. Коефіцієнт форми при значенні 2 збільшується на 8 %, а площа зерен фериту в інтервалі від 100 до 300 мкм² складає після нормалізації 94 %, що в 2,1 рази більше ніж у вихідному стані.

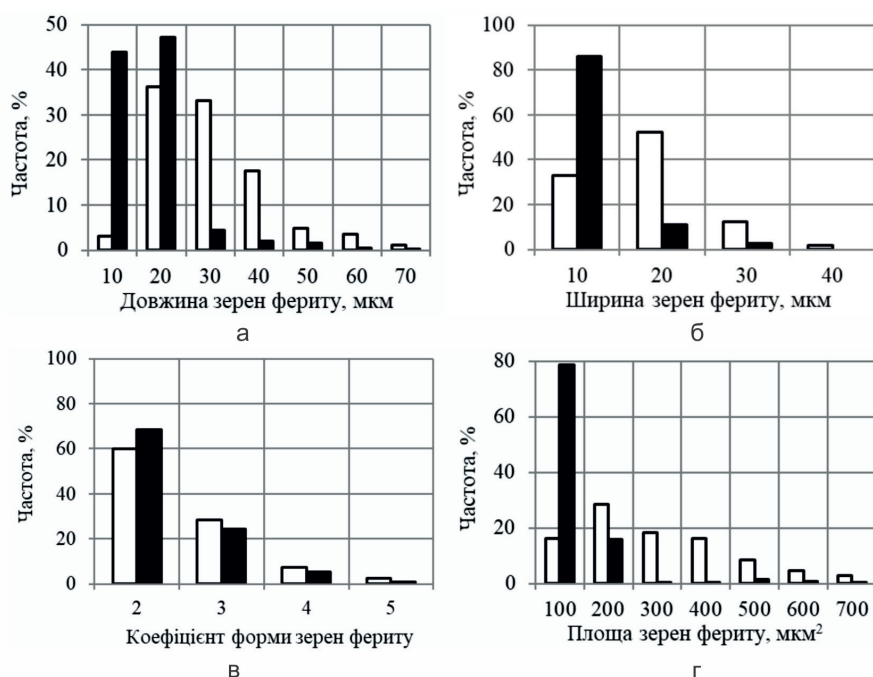


Рис. 3. Розподіл довжини (а), ширини (б), коефіцієнта форми (в) та площі зерен (г) фериту в литому (□) та нормалізованому (■) стані сталі.

Fig. 3. Distribution of the length (a), width (б), shape factor (в), and area (г) of ferrite grains in steel in the as-cast (□) and normalized (■) conditions.

Дані наведені на рис. 4 показують, що розподіл перліту в мікроструктурі литої сталі після нормалізації змінюється наступним чином.

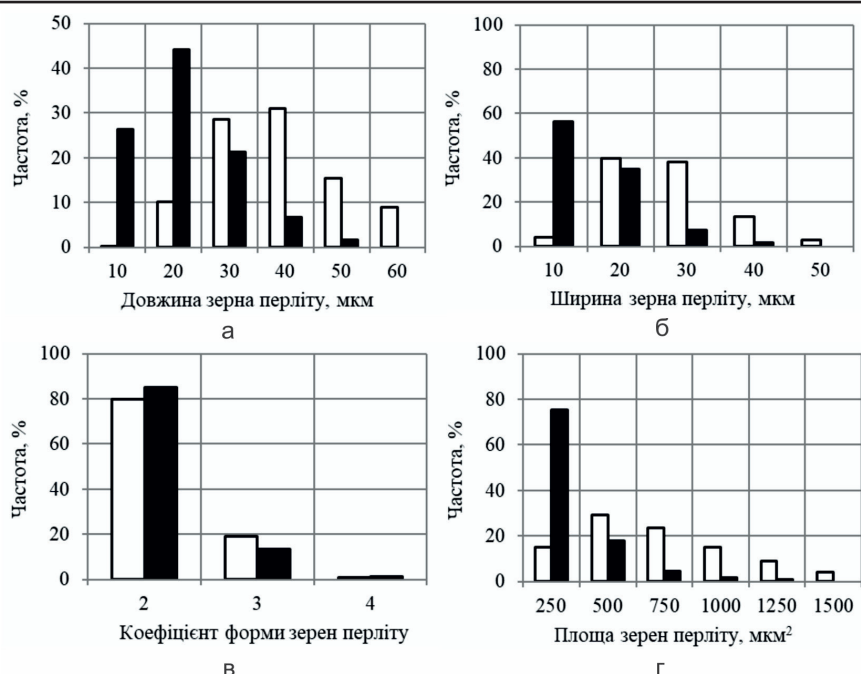


Рис. 4. Розподіл довжини (а), ширини (б), коефіцієнта форми (в) та площі зерен (г) перліту в литому (□) та нормалізованому (■) стані сталі.

Fig. 4. Distribution of the length (а), width (б), shape factor (в), and area (г) of pearlite grains in steel in the as-cast (□) and normalized (■) conditions.

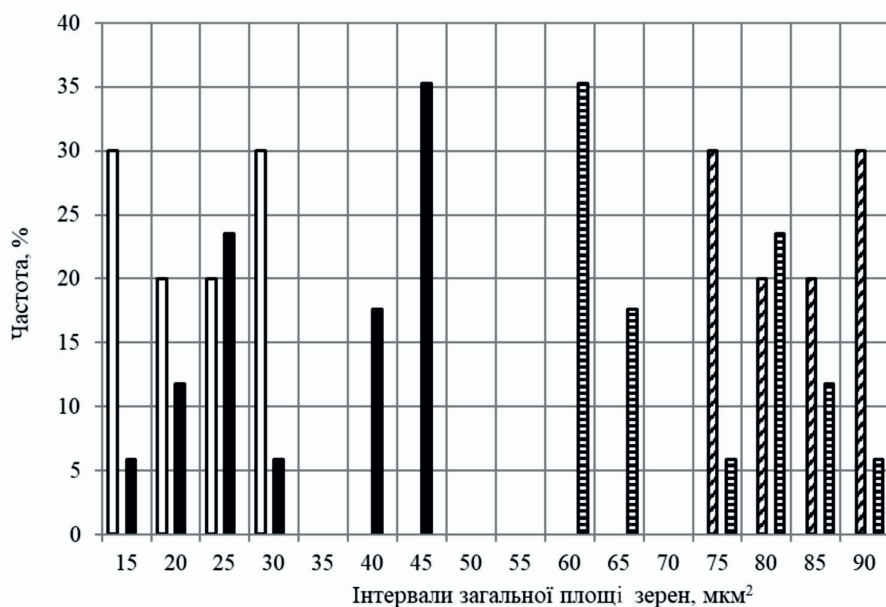


Рис. 5. Розподіл загальної площі зерен фериту та перліту в литому та нормалізованому стані сталі. □ – литий стан фериту, ■ – нормалізований стан фериту, ▨ – литий стан перліту, ▩ – нормалізований стан перліту.

Fig. 5. Distribution of the total area of ferrite and pearlite grains in steel in the as-cast and normalized conditions. □ – as-cast ferrite, ■ – normalized ferrite, ▨ – as-cast pearlite, ▩ – normalized pearlite.

Довжина і ширина зерен перліту, в інтервалі від 10 до 50 мкм, змінюється, відповідно, з 85 до 100 і з 95 до 100 % випадків, коефіцієнт форми у 99 % випадків в інтервалі 1-4. Значення середньої площі перлітного зерна у литому стані у 98 % випадків знаходиться в інтервалі від 0 до 1750 мкм², а після нормалізації у 99 % випадків – від 0 до 1250 мкм².

Загальна площа фериту в литому стані складає 100 % в інтервалі від 15 до 30 мкм², а після нормалізації від 15 до 45 мкм² (рис. 5). Загальна площа перліту в аналогічному інтервалі змінюється відповідно з 75-90 мкм² до 60-90 мкм².

Використання комп'ютерного програмного аналізу зображення структур сталі дозволило визначити додаткові показники, що характеризують підвищення її однорідності і дисперсності, а також співвідношення структурних складових та їх зміни після нормалізації литої сталі з додаткового нагріву.

Література

1. ГОСТ 8233–56. Еталоны микроструктуры. – М. : Изд-во стандартов, 1956. – 21 с.
2. ГОСТ 1435–99. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 23 с.
3. ГОСТ 5639–82. Стали и сплавы. Методы определения величины зерна. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 45 с.
4. SEO ImageLab. Программное обеспечение для анализа изображений [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://seo-tec.com.ua/ImageAnalyzers/ImageAnalyzers.html>
5. ImageJ. Image Processing and Analysis in Java [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://imagej.nih.gov/ij/>
6. Гуреева, М. А. Металловедение: макро- и микроструктуры литейных алюминиевых сплавов / М. А. Гуреева, В. В. Овчинников, И. Н. Манаков. – М. : Юрайт, 2019. – 254 с.
7. Рабинович, М. Х. К вопросу о влиянии сверхпластической деформации на матричную структуру сплавов / М. Х. Рабинович, В. Г. Трифонов // Металловедение легких сплавов. – М. : ВИЛС, 1985. – С. 85-93.
8. Носенко, В. А. Коэффициент формы зерен фракций шлифовальных порошков карбида кремния / В. А. Носенко, А. А. Александров, А. В. Авилов // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 2. – С. 53-57.

References

1. GOST 8233–56. (1956). *Etalony mikrostruktury* [Microstructure standards]. Moscow: Publishing House of Standards. [in Russian]
2. GOST 1435–99. (1999). *Prutki, polosy i motki iz instrumental'noi nelegirovannoi stali* [Bars, strips, and coils of non-alloy tool steel]. Moscow: Publishing House of Standards. [in Russian]
3. GOST 5639–82. (1982). *Stali i splavy. Metody opredeleniya velichiny zerna* [Steels and alloys. Methods for determining grain size]. Moscow: Publishing House of Standards. [in Russian]
4. SEO ImageLab. (n.d.). *Image analysis software*. Retrieved from <https://seo-tec.com.ua/ImageAnalyzers/ImageAnalyzers.html> [in English]

5. ImageJ. (n.d.). *Image processing and analysis in Java*. Retrieved from <https://imagej.nih.gov/ij/> [in English]
6. Gureeva, M. A., Ovchinnikov, V. V., & Manakov, I. N. (2019). *Metallovedenie: makro- i mikrostruktury liteinykh alyuminievykh splavov* [Physical metallurgy: Macro- and microstructures of cast aluminum alloys]. Moscow: Yurait. [in Russian]
7. Rabinovich, M. Kh., & Trifonov, V. G. (1985). On the influence of superplastic deformation on the matrix structure of alloys. In *Metallovedenie legkikh splavov* (pp. 85-93). Moscow: VILS. [in Russian]
8. Nosenko, V. A., Aleksandrov, A. A., & Avilov, A. V. (2017). Grain shape coefficient of fractions of silicon carbide abrasive powders. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, (2), 53-57. [in Russian]

Одержано 01.12.25

Impact of normalization on the quantitative parameters of the microstructure of structural steel

Ye. G. Aftandiliants¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher, aftyev@yahoo.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5864-9855>

Yu. G. Kvasnitska¹, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Head of Department, jul.kvasnitskaja@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3790-2035>

V. I. Veis¹, PhD, Researcher, valentynevis@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8889-2303>

T. V. Stepanova¹, Researcher, stept@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-5489-9595>

Zh. V. Parkhomchuk¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Scientific Associate, zhanna_parkhomchuk@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3026-8951>

K. G. Kvasnitska², PhD, Associate Professor, katonish@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8712-9285>

¹Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Summary

The article examines the impact of normalization on key quantitative parameters of the microstructure of as-cast structural steel, such as grain length, width, shape factor, grain area, and the total area of ferrite and pearlite. The capabilities of microstructure analysis using computer image analysis software are demonstrated, in comparison with the study of microstructure using reference scales. It was established that after normalization from 865 °C, the length and width of ferrite grains decreased by factors of 1.88 and 2.33, respectively; the shape factor decreased by 10-12 %; the average area of a ferrite grain decreased by a factor of 4.78-5.18; while the total area of ferrite increased by a factor of 1.3-1.5. The length and width of pearlite grains decreased

by factors of 2.21 and 2.01, respectively; the shape factor decreased by 3-12 %; the average area of a pearlite grain decreased by a factor of 3.96-4.02; and the total area of pearlite decreased by 2-15 %. It is shown that the refinement (dispersion) of the steel microstructure occurs due to an increase in the percentage of structural elements with smaller sizes. The proportion of ferrite grains with length and width in the range of 10-20 μm increased from 39 % and 85 % in the initial state to 91 % and 97 % after normalization, i.e., by a factor of 2.3 and by 14 %, respectively. The proportion of grains with a shape factor of 2 increased by 8 %, and the proportion of ferrite grains with an area in the range of 100-300 μm^2 after normalization reached 94 %, which is 2.1 times higher than in the initial state. It was established that the distribution of pearlite in the microstructure of as-cast steel after normalization is characterized by the following: the proportion of pearlite grains with length and width in the range of 10-50 μm changed from 85 % to 100 % and from 95 % to 100 % of cases, respectively; the shape factor in 99 % of cases was within the 1-4 range. The value of the average pearlite grain area in the as-cast state was within the 0-1750 μm^2 range in 98 % of cases, while after normalization it was within 0-1250 μm^2 in 99 % of cases. It is shown that the total area of ferrite in the as-cast state was 100 % within the range of 15-30 μm^2 , and after normalization within 15-45 μm^2 . The total area of pearlite in a similar interval changed from 75-90 μm^2 to 60-90 μm^2 , respectively. The materials of the article can be used by researchers for the quantitative analysis of the influence of external factors on the microstructure of metals and alloys.

Keywords: steel, chemical composition, normalization, quantitative analysis, ferrite, pearlite, grain, size, shape factor.

Журнал **МОН** внесено до Переліку наукових фахових видань України згідно з наказом Міністерства освіти і науки України №409 від 17.03.2020.

Повна назва журналу
**"Науково-технічний журнал
"Металознавство та обробка металів"**

Вартість одного номера журналу - 150 грн.
Перед оплатою необхідно узгодити потрібну кількість номерів з редакцією.

Оплата здійснюється на розрахунковий рахунок Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України.

Доступні архівні номери журналу з 1995 р. по 2024 р. включно.

**Розрахунковий рахунок для замовників,
спонсорів і рекламодавців:**
р/р UA828201720313251001201012215,
банк ДКСУ в м. Києві код банку 820172
Отримувач - ФТІМС НАН України, код ЄДРПОУ 05417153,
з посиланням на журнал "МОН"

Копію документа оплати та відомості про отримувача
просимо надсилати до редакції,
вказавши номер і дату платіжного документа.