

https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-98-104 УДК 669.13.017:620.18 Поступила 06.02.2025 Received 06.02.2025

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ФЕРРИТА И ПЕРЛИТА В ЧУГУНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТНЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. И. ПОКРОВСКИЙ, Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь, ул. Купревича, 10. E-mail: art@phti.by

Используемый в металловедческой практике ГОСТ 3443—87 не позволяет дать точную количественную оценку содержания перлита и феррита в структуре чугуна, а специализированные компьютерные программы количественного анализа изображений микроструктур достаточно дорогие, имеются в распоряжении не у всех предприятий и к тому же требуют высококвалифицированного персонала.

В данной работе предложена новая, простая методика определения количества феррита и перлита в чугуне с использованием специального травителя, обеспечивающего высокий контраст картины травления, и стандартных компьютерных программ обработки изображений, имеющихся у каждого пользователя, которые позволяют получить гистограмму распределения оттенков серого цвета от черного к белому в интервале от 0 до 255. Затем проводится дополнительная бинаризация изображения с разделением его только на черный и белый цвет. На получаемой гистограмме высота пиков черного цвета прямо пропорциональна содержанию перлита в сумме с графитом, а белого – содержанию феррита. Предварительно определенное на нетравленом шлифе содержание графитных включений позволяет получить точное соотношение перлита и феррита в исследуемом сплаве.

Ключевые слова. Высокопрочный чугун, микроструктура, количественный микроанализ, гистограмма интенсивности, перлит, феррит, включения графита.

Для цитирования. Покровский, А.И. Методика определения количества феррита и перлита в чугуне с использованием стандартных компьютерных программ обработки изображений / А.И. Покровский // Литье и металлургия. 2025. № 1. С. 98–104. https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-1-98-104.

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE AMOUNT OF FERRITE AND PEARLITE IN CAST IRON USING STANDARD COMPUTER IMAGE PROCESSING PROGRAMS

A. I. POKROVSKY, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus, 10, Kuprevich str. E-mail: art@phti.by

Standard GOST 3443–87 used in metallurgical practice does not permit an accurate quantitative assessment of the content of pearlite and ferrite in the structure of cast iron while specialized software for computer image analysis is rather expensive, are not available to all enterprises and, moreover, require highly qualified staff.

In this work, a new, simple technique is proposed for determining the amount of ferrite and pearlite in cast iron using a special etchant that provides a high-contrast image, and standard computer image processing programs, which permit obtaining a grayscale histogram where the shades of gray vary from black to white in the range from 0 to 255. Then, an additional binarization is performed to convert the image into black and white only. In the resulting histogram, the height of black peaks is directly proportional to the content of perlite in combination with graphite, while that of white peaks is proportional to the content of ferrite. The amount of graphite inclusions preliminarily determined on the unetched metallographic section permits determining the exact ratio of pearlite and ferrite in the alloy.

Keywords. Ductile cast iron, microstructure, quantitative microanalysis, intensity histogram, pearlite, ferrite, graphite inclusions. *For citation.* Pokrovsky A.I. Methodology for determining the amount of ferrite and pearlite in cast iron using standard computer image processing programs. Foundry production and metallurgy, 2025, no. 1, pp. 98–104. https://doi.org/10.21122/ 1683-6065-2025-1-98-104.

Введение

Количественная металлография и стереологический анализ широко применяются в материаловедении [1]. Развитие методов количественной микроскопии прошло достаточно долгий путь: от простых визуальных оценок к более точным методам планиметрирования, далее – к созданию эталонных шкал и современным программам компьютерного анализа электронных изображений микрошлифа. К методам планиметрирования относятся точечный метод А.А. Глаголева [2], основанный на статистическом анализе точек, принадлежащих какой-либо фазе, попадающих в перекрестия сетки окулярмикрометра. Известен также линейный метод Розиваля [3], основанный на пересечении шлифа прямыми линиями с последующим измерением и суммированием отрезков, проходящих через каждую фазу. Оба метода достаточно точны, но чрезвычайно трудоемки и эпоха таких измерений, пожалуй, завершилась.

В настоящее время широко распространены компьютерные методы анализа изображений. Перечислим лишь некоторые лицензионные программы для количественного обсчета изображений различных производителей: ZEISS ZEN [4], ImageSP [5], Thixomet [6], NEXSYS ImageExpert Pro 3 [7], SIAMS [8]. Определенные работы по разработке математических методов анализа микроструктур проводили и в Беларуси [9].

Что касается количественного микроанализа структуры чугунов, то на практике на многих предприятиях Беларуси до сих пор используется метод эталонов. По нему количество перлита или феррита оценивается средним процентом площади, занятой этими структурными составляющими на шлифе и определенной не менее чем в трех полях зрения, т. е. количественная оценка исследуемого шлифа проводится только по приблизительному соответствию или несоответствию интервалу оценочных баллов, по визуальному критерию «больше-меньше». До сих пор активно используется ГОСТ 3443–87 [10], который предусматривает для определения количества перлита всего девять уровней градации, причем диапазон значений в них достаточно широк. Так, показатель П45 означает, что содержание перлита колеблется в весьма широких пределах от 30 до 60%. Этого явно недостаточно в большинстве случаев для принятия решения о пригодности сплава с данной структурой для изготовления конкретных изделий.

Таким образом, используемый в металловедческой практике ГОСТ 3443–87 не позволяет дать точную количественную оценку содержания перлита и феррита в структуре чугуна, а специализированные лицензионные программы компьютерного обсчета изображений достаточно дорогие, имеются в распоряжении не у всех предприятий и к тому же требуют высококвалифицированного персонала.

Цель работы – разработка простой и более точной методики определения количества перлита и феррита в структуре чугуна по оптическому изображению микроструктуры с использованием не специализированных, а стандартных компьютерных программ, имеющихся у большинства рядовых пользователей.

Поставленная цель решается селективным травлением шлифа специальным травителем, при котором длительность травления увеличена и достигается более высокий контраст изображения. Последующая компьютерная обработка изображения позволяет получить гистограмму распределения оттенков серого цвета от черного к белому в интервале от 0 до 255. Затем в любой стандартной программе обработки изображений проводится дополнительная бинаризация изображения с разделением его только на черный и белый цвет. На получаемой гистограмме высота пиков черного цвета прямо пропорциональна площади, занимаемой в сумме перлитом и графитом, а белого – ферритом. Предварительно определенное на нетравленом шлифе количество графитных включений вычитается из общего количества пикселей черного цвета, и остаток соответствует количеству перлита. Количество пикселей белого цвета соответствует количеству феррита.

Решаемые задачи

1. Разработка состава более «мягкого» металлографического травителя, обеспечивающего большую длительность процесса травления и более высокий контраст изображения между ферритом и перлитом.

2. Преобразование оптического изображения в цифровую форму, построение гистограммы распределения оттенков серого цвета и ее бинаризация. Высота черного пика будет пропорциональна количеству перлита вместе с графитом, а белого – количеству феррита.

3. Вычисление доли структурных составляющих: вначале суммарного количества графита и перлита, затем перлита и после этого феррита.

Методика исследований

Исследование микроструктуры проводили методом оптической микроскопии на микроскопе «Микро-200 vert» (Планар, Беларусь), связанном системой видеонаблюдения с персональным компьютером при увеличениях от 100 до 1000. Для травления использовали 5 %-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте (ниталь), а также предложенный в статье новый состав травителя.

Результаты и их обсуждение

Типичным способом выявления микроструктуры сплавов на основе железа является химическое травление поверхности шлифа в 1–10%-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте и последующий визуальный анализ картины травления при 50–1500-кратном оптическом увеличении [11].

Особенностью спиртового раствора азотной кислоты является то, что при ее невысоких концентрациях, например 1%, после травления области феррита выглядят светло-серыми, а перлита – полосчатыми (за счет различия травимости пластин феррита и цементита, входящих в состав перлита). При увеличении концентрации азотной кислоты до 4% и более области перлита быстро темнеют, а феррит остается светло-серым. Даже небольшое увеличение времени и глубины травления приводит к потемнению областей феррита. Таким образом, данный способ характеризуется непостоянностью контраста изображения выявленных структурных составляющих чугуна.

В предлагаемой методике для оценки количественного соотношения перлита и феррита нам необходим более высокий черно-белый контраст изображения (черный – перлит, белый – феррит), достигаемый при более высокой (около 10%) концентрации кислоты и небольшом времени травления. Однако при такой концентрации азотной кислоты уловить момент травления, когда достигается максимальный контраст изображения составляющих структуры чугуна, достаточно сложно, так как шлиф травится очень быстро. Даже при небольшом превышении оптимального времени травления феррит очень быстро темнеет и контраст теряется. Потемнение зерен феррита объясняется возникновением микрорельефа травления, обусловленного выявлением границ зерен и других дефектов, выходящих на поверхность шлифа (рис. 1).



Рис. 1. Потемнение феррита в микроструктуре высокопрочного чугуна из-за выявляющихся дефектов структуры, затрудняющее определение его количества, травлено ниталем. × 1000

Первым шагом является металлографическое травление шлифа, при котором высокий контраст изображения достигается за счет использования состава более «мягкого» травителя. Это достигается добавлением в раствор азотной кислоты в спирте определенного количества уксусной кислоты.

Предложенный состав травителя следующий: азотная кислота – 3–10 мас. %; уксусная кислота – 1–5 мас. %; этиловый спирт – остальное.

Экспериментально установлено, что добавка уксусной кислоты в количестве 1–5 мас. % позволяет значительно расширить временной интервал применения травителя. Особенностью данного травителя является то, что темный тон окраски областей перлита и светлый тон окраски областей феррита сохраняются при длительном времени травления, что и обеспечивает стабилизацию контраста изображения областей феррита и перлита.

Показано, что дополнительное использование пониженной температуры еще более способствует расширению временно́го интервала процесса травления и обеспечивает высокий контраст полученных изображений. Такой состав менее чувствителен к наличию дефектов структуры отдельных зерен феррита и обладает полирующим эффектом. В процессе травления зерна феррита намного дольше сохраняют гладкую поверхность, которая обеспечивает зеркальное отражение света и соответственно светлый тон этих областей. При воздействии травителя на области перлита они приобретают почти черный цвет. Графит не взаимодействует с таким травителем и поэтому остается черным.

Таким образом, до травления темные области изображения отражают только содержание графита, а после травления – суммарное количество графита с перлитом. Поэтому для количественного определения состава фаз на первом этапе проводят анализ изображения шлифа до травления, а на втором – после него. Вторым шагом является преобразование оптического изображения в цифровую форму при помощи цифровой фото- или видеокамеры. Оптическое изображение травленой поверхности шлифа фактически является черно-белым. Поэтому его цифровое изображение состоит из оттенков серого цвета, а на экране монитора оно представляет собой плоскую матрицу, в ячейках которой находятся показатели интенсивностей (значения от 0 до 255) выбранных элементарных фрагментов этого изображения при наиболее часто используемой глубине цвета 8 бит на канал.

Так как содержание выбранной фазы в составе исследуемого материала отражается долей занимаемой ею площади шлифа, то это содержание можно рассчитать по количеству пикселей, соответствующих цвету анализируемой фазы, что легко определяется по гистограмме распределения интенсивности изображения. Типичная гистограмма распределения интенсивности изображения шлифа чугуна (рис. 1), полученная при травлении в стандартном травителе, приведена на рис. 2. На гистограмме видно, что она содержит два сильно перекрывающихся пика (один в области темных оттенков серого, а другой в области светлых оттенков), что делает невозможным однозначное их разделение для проведения количественных оценок.



Рис. 2. Типичная гистограмма распределения интенсивностей цифрового изображения шлифа высокопрочного чугуна, травленого ниталем обычным методом (соответствующая микроструктура представлена на рис. 1)

Картина травления шлифа того же чугуна с использованием предложенного травителя (рис. 3, *a*) является более «чистой», перлит окрашен в сравнительно однородный темно-серый цвет, а различные дефекты, дающие потемнение на изображении, практически не выявляются.



Рис. 3. Схема бинаризации изображения структуры высокопрочного чугуна с феррито-перлитной матрицей: *a* – травлено предложенным травителем с добавлением уксусной кислоты, *δ* – бинаризованное изображение травленого шлифа (черно-белое). × 1000

Третий шаг – бинаризация изображения и проведение вычислений фазового состава. Бинаризация преобразует многоцветное изображение (256 оттенков серого) в двуцветное (чисто черные и чисто белые цвета) и может осуществляться при помощи любой из стандартных программ обработки изображения. Пример разделения пиков, принадлежащих разным фазам, путем выбора минимума интенсивностей на гистограмме, по которому осуществляется бинаризация, приведен на рис. 4.



Рис. 4. Схематическое изображение выбора минимума интенсивностей изображения, служащего границей между цветами

Гистограмма распределения интенсивности изображения шлифа до бинаризации (см. рис. 3, *a*) содержит два более выраженных пика (рис. 5, *a*). Содержание перлита в сумме с графитом соответствует площади пика в области темных оттенков (пик слева). Содержание феррита, который выглядит светлосерым после травления шлифа, соответствует площади пика в области светлых оттенков (пик справа). Однако на основании этой гистограммы определение количественного соотношения фаз в исследуемой структуре чугуна несколько затруднительно.

Более удобной для расчета является гистограмма распределения интенсивности изображения микроструктуры (см. рис. 3, б) после ее бинаризации. Полученная гистограмма, приведенная на рис. 5, б, содержит только два пика в виде линий: слева – 0 (черный цвет – перлит и графит) и справа – 255 (белый цвет – феррит). Высота каждой из этих линий является количеством пикселей этого цвета и отражает содержание выбранной фазы.



Рис. 5. Гистограмма распределения интенсивностей изображения шлифа высокопрочного чугуна после травления предложенным травителем до (*a*) и после бинаризации изображения (*б*)

Количественный анализ проводится в следующей последовательности:

1. Получают оптическое изображение <u>нетравленого</u> шлифа, проводят его оцифровку, бинаризацию, получают гистограмму и определяют количество графита (Г) по формуле:

$$\Gamma = j_1 / (j_1 + i_1) \cdot 100\%$$

где *j*₁, *i*₁ – соответственно количество черных и белых пикселей изображения на первом этапе.

2. Проводят <u>травление</u> шлифа в предложенном металлографическом реактиве (азотная и уксусная кислота в описанном выше соотношении в этиловом спирте).

3. Получают оптическое изображение травленого шлифа, проводят оцифровку, бинаризацию, получают его гистограмму.

4. Рассчитывают процентное содержание перлита (П) по отношению к площади шлифа:

$$\Pi = [j_2 / (j_2 + i_2)] \cdot 100\% - \Gamma,$$

где j_2 , i_2 – соответственно количество черных и белых пикселей изображения на втором этапе; Γ – количество графита.

5. В завершении определяют процентное содержание феррита (Ф) по отношению к площади шлифа:

$$\Phi = 100\% - \Pi - \Gamma.$$

Разберем последовательность вычислений на конкретном примере.

1. Предварительно выполненный снимок нетравленого шлифа включал в себя 1765 черных пикселей из общего количества 28110 пикселей изображения, соответственно количество графита составило: 1765/28110 · 100 %=6% от площади шлифа.

2. На втором снимке травленого шлифа получено 18482 черных пикселя из общего количества 28475 пикселей изображения. Соответственно суммарное количество перлита и графита составило: 18482/28475 · 100%=65%.

3. Вычитая из полученного значения количество графита, легко определить количество перлита: 65%-6%=59%. Это точное количество при том, что ГОСТ 3443-87 трактовал бы его лишь приблизительно как П45, т.е. в очень широких пределах от 30 до 60%.

4. Процентное содержание феррита по отношению к площади шлифа определяется вычитанием из общей площади (100%) количества перлита (59%) и графита (6%), т. е. как: 100% – 59% – 6% = 35%.

Исходя из полученных данных, можно определить количество перлита и феррита по отношению к площади металлической матрицы (100%). Оно составит соответственно 65 и 37%. Данный способ определения количества структурных составляющих в чугуне защищен патентом Республики Беларусь [12].

Выводы

1. Специализированные компьютерные программы количественного анализа изображений микроструктур (ZEISS ZEN, Thixomet, NEXSYS ImageExpert Pro 3, SIAMS, Image SP и др.) достаточно дорогие, имеются в распоряжении не у всех предприятий и к тому же требуют высококвалифицированного персонала. При этом используемый в металловедческой практике Беларуси ГОСТ 3443–87 не позволяет дать точную количественную оценку содержания перлита и феррита в структуре чугуна. В связи с этим предложена новая, простая методика более точного определения количества феррита и перлита в структуре чугуна с использованием специального травителя, обеспечивающего замедленное травление и более высокий контраст изображения, а также стандартных компьютерных программ обработки изображения, имеющихся у каждого пользователя, которые позволяют получить гистограмму распределения оттенков серого цвета от черного к белому в интервале от 0 до 255.

2. Особенностью методики является использование дополнительной бинаризации изображения с разделением его только на черный и белый цвет. На получаемой гистограмме высота пиков черного цвета прямо пропорциональна совместному содержанию перлита и графита, а белого – феррита. Предварительно определенное на нетравленом шлифе количество графитных включений вычитается из общего количества пикселей черного цвета и остаток соответствует количеству перлита. Количество пикселей белого цвета соответствует количеству феррита.

Работа выполнена в ФТИ НАН Беларуси в рамках ГНПИ «Электромагнитные технологии». Задание № 3.3.3.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Салтыков, С.А. Стереометрическая металлография / С.А. Салтыков. М.: Металлургия, 1976. 270 с.
- 2. Метод Глаголева [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://metallurgicheskiy.academic.ru/6180.
- 3. Геологичесий словарь: в 2 т. / ред. К. Н. Паффенгольц. М.: Недра, 1978. 455 с.
- 4. ZEISS ZEN core v3.2 Software Manual / Carl Zeiss Microscopy GmbH ZEISS Group. 2020. 792 p.
- 5. Sys-prog (программа ImageSP) [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://sys-prog.com/po-dlya-nauki/imagesp.
- 6. Thixomet [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://thixomet.ru.
- 7. NEXSYS [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://nexsys.ru/software/pro-3.
- 8. SIAMS [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.siams.com.

9. О новых математических методах анализа микроструктур эвтектоидных колоний перлитных сталей / А.Н. Чичко [и др.] // Литье и металлургия. – 2008. – № 4. – С. 104–112.

10. ГОСТ 3443–87. Отливки из чугуна с различной формой графита. Методы определения структуры. – Введ. 1988–01–07. – М.: Стандартинформ, 2005. – 42 с.

11. **Беккерт, М.** Справочник по металлографическому травлению / М. Беккерт, Х. Клемм. – М.: Металлургия, 1979. – С. 27, 80–81.

12. Способ металлографического контроля структуры чугуна: патент (изобретение) 21281 Респ. Беларусь / А.И. Покровский; № a20140377, заявл. 09.07.2014, опубл. 30.08.2017 // Афіц. бюлл. / НЦІУ.– 2017.– № 4.– С. 107–108.

REFERENCES

- 1. Saltykov S.A. Stereometricheskaya metallografiya [Stereometric metallography]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1976, p. 270.
- 2. Metod Glagoleva [Glagolev method] [Electronic resource]. Accessed at: https://metallurgicheskiy.academic.ru/6180.
- 3. Paffengolts K. N. (ed.). Geologichesij slovar' [Geological Dictionary]. Moscow, Nedra Publ., 1978, 455 p.
- 4. ZEISS ZEN core v3.2 Software Manual / Carl Zeiss Microscopy GmbH ZEISS Group, 2020, 792 p.
- 5. Sys-prog (ImageSP program) [Electronic resource]. Accessed at: https://sys-prog.com/po-dlya-nauki/imagesp.
- 6. Thixomet [Electronic resource]. Accessed at: https://thixomet.ru.
- 7. NEXSYS [Electronic resource]. Accessed at: https://nexsys.ru/software/pro-3.
- 8. SIAMS [Electronic resource]. Accessed at: www.siams.com.

9. Chichko A.N., Sachek O.A., Vedeneev A.V., Sobolev V.F. O novyh matematicheskih metodah analiza mikrostruktur evtektoidnyh kolonij perlitnyh stalej [On new mathematical methods of analysis of the pearlitic steels eutectoid colonies microstructure]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2008, no. 4, pp. 113–117.

10. GOST 3443–87. Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. Metody opredeleniya struktury [Cast iron castings with various forms of graphite. Methods for determining structure]. Intr. 1988–01–07. Moscow, Standartinform Publ., 2005, 42 p.

11. Beckert M., Klemm H. Spravochnik po metallograficheskomu travleniyu [Handbook of metallographic etching]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979, pp. 27, 80–81.

12. **Pokrovsky A.I.** *Sposob metallograficheskogo kontrolya struktury chuguna: patent (izobretenie) 21281 Resp. Belarus* '[Method for metallographic control of cast iron structure: patent (invention) 21281 Rep. Belarus]. No. a20140377, application 09.07.2014, publ. 30.08.2017. Afits. bulletin / NCIU = Afic. byull. / NCIU, 2017, no. 4, pp. 107–108.