

УДК 621.74

Іванов В. Г.

д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри Машини та технологія ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ivanov@zntu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9216-3493

Матвейшин М. В.

аспірант кафедри Машини та технологія ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: nmatveishin@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6050-310X

## АНАЛІЗ ГРАФІТОВОЇ ФАЗИ У ВІДЦЕНТРОВИХ ЗАГОТІВКАХ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

**Мета роботи.** Визначити характерні геометричні параметри кулястих графітних вкраплень за перерізом чавунної заготовки для поршневих кілець.

**Методи дослідження.** Циліндричну заготовку для поршневих кілець отримували відцентровим способом. Хімічний склад заготовки відповідав марці ВЧ 500-2 (ДСТУ 3925-99). Для отримання кулястого графіту використовували нікель-магнієву лігатуру (15 % Mg) та вторинне графітує модифікування феросилікобарієм ФС65Ба4. Кількість кожної добавки складала 1,0 % від маси металу. Кулястий графіт оцінювали згідно ГОСТ 3443 та за декількома характерними геометричними параметрами. Для цього використовували комп'ютерний аналізатор зображень на базі мікроскопу «ZEISS. Epityp-2» з цифровою відеокамерою «Baumer».

**Отримані результати.** Розглянуто геометричні параметри графітних вкраплень за перерізом відцентрової заготовки з високоміцного чавуну. Встановлено суттєву різницю геометричних параметрів кулястих вкраплень графіту за декількома розмірними групами, що утворюються у різних шарах чавунної заготовки, яку отримують відцентровим способом лиття.

**Наукова новизна.** Класифіковано вкраплення кулястого графіту у маслотної заготовці за 6-ти розмірними групами ГОСТ 3443 та 11-ти розмірними групами, побудованими в арифметичній прогресії. Встановлено суттєві відмінності зовнішнього та центрального шарів виливки: у 2,14 рази – за кількістю дрібних (5...10 мкм) вкраплень; у 1,59 рази – за кількістю вкраплень розміром 10...15 мкм, у 1,4 рази – за кількістю вкраплень розміром 20...25 мкм; у 3...9 разів – за кількістю великих (понад 35 мкм вкраплень).

**Практична цінність.** Порівняльна оцінка морфології кулястого графіту у зовнішньому, центральному та внутрішньому шарах відцентрованої заготовки дозволить вдосконалити технологічні параметри виробництва литих поршневих кілець з метою забезпечення високого ресурсу двигунів або компресорів.

**Ключові слова:** чавун, кулястий графіт, відцентрове лиття, поршневі кільця, геометричні параметри.

### Вступ

Поршневі кільця, матеріалом для яких найчастіше служать спеціальні сірі або високоміцні чавуни, відносять до особливої групи деталей для двигунів внутрішнього згорання. Хімічний склад, структура і властивості чавунів регламентуються відповідними державними та галузевими нормативними документами. Як правило, контролюються декілька важливих показників: хімічний склад, форма та характер розподілу графіту, розподіл фосфідної евтектики, ступінь перлітизації, наявність цементиту, а також можуть контролювати деякі механічні властивості. Останнім часом перевагу віддають високоміцному чавуну для виготовлення поршневих кілець, різноманітних за розмірами, вагою та призначенням.

Технологія виробництва кілець також досить широка: кільця можуть виготовлятися з індивідуальних заготовок, з суцільних масивних циліндричних заготовок, звідцентрових маслот та іншими методами. У масовому виробництві поршневих кілець діаметром до 500 мм переважно використовують відцентровий спосіб лиття маслот, який забезпечує економічність

процесу та дозволяє отримати достатньо високій рівень фізико-механічних властивостей [1].

У зв'язку з компактною формою кулястих вкраплень графіту при відцентровому литті очікується їх полегшена сегрегація і концентрація у внутрішніх зонах [2].

Крім того, зазвичай відцентрова сила буде вносити певні особливості у зародження та формування графітових кулястих вкраплень. Слід відзначити, що відомості про вплив відцентрових сил на утворення графіту у чавунах досить обмежені у науковій літературі [3, 4].

Як відомо у чавунах форма графітових вкраплень у значній мірі визначає весь комплекс фізико-механічних та експлуатаційних властивостей [5].

Тому точна оцінка морфології графітових вкраплень дозволяє прогнозувати властивості та розробляти раціональні економічно обґрунтовані технологічні процеси виготовлення литих виробів. Відомостей про кількісну різницю структури чавуну за перерізом і, особливо, про кількісні характеристики графітної фази при відцентровому литті накопичено недостатньо, що

багато в чому обмежує можливості покращення технологічних параметрів виробництва та якості поршневих кілець.

### Аналіз досліджень та публікацій

У сучасній металографії існує три способи оцінки мікроструктури [6]: кількісно – описова, напівкількісна (балова оцінка у порівнянні зі структурами стандартних шкал) та суворо кількісна оцінка за геометричними параметрами мікроскопічної будови. Перші два способи мають суб'єктивний характер і результати оцінки різних спостерігачів часто суттєво відрізняються [6].

Для усунення суб'єктивності порівняльної оцінки реальних структур чавунів з еталонними зображеннями можливо застосовувати різні комп'ютеризовані програми, що мають високу достовірність (Dup Detector v 3.122, Fast Duplicate Finder 3.7.0.1, Dupе Guru PE, AntiTwin, SyCMPi) [7].

Для забезпечення високої об'єктивності визначення структури чавунів краще використовувати кількісну оцінку за геометричними параметрами. Для оцінки форми вкраплень графіту у високоміцних чавунах можна користуватися також безрозмірними співвідношеннями між основними геометричними параметрами, що характеризують розміри вкраплень графіту.

Салтиков С. А. [6] пропонує використовувати коефіцієнт форми або фактор форми. Для плоских фігур зручно користуватися двомірним фактором форми, що визначається відношенням їх площі до периметру. Для круга його значення складає одиницю, для правильного шестикутника – 0,953, для квадрата – 0,886, для трикутника – 0,777. Значення двомірного фактору форми можна визначити за формулою [6]

$$\Phi = 2 \frac{\sqrt{\pi F}}{P} = 3,545 \frac{\sqrt{F}}{P}, \quad (1)$$

де  $F$  – площа вкраплення;

$P$  – периметр вкраплення.

Соценко О. В. [8] додатково радить використовувати показник компактності вкраплення

$$\Phi_K = \frac{F}{F_0}, \quad (2)$$

де  $F_0$  – площа круга, що описує вкраплення.

Для полегшення застосування цих характеристик на практиці були розроблені еталонні шкали для різноманітних модифікацій форм графітових вкраплень.

Для визначення кількості кулястих вкраплень графіту у об'ємі чавуну використовують також декілька методів [6]: зворотних діаметрів, проєкційних зображень та ін.

Визначення розподілу вкраплень графіту за розмірними групами також потребує вводити декілька показників, що визначаються методом хорд, укрупнених показників та ін. [6].

Для одночасного визначення кількості та форми графіту Юзвак В. М запропонував використовувати

індекс графіту [9]:

$$J_r = \frac{\sum a_i z}{L}, \quad (3)$$

де  $\sum a_i$  – сума максимальних розмірів вкраплень графіту, що потрапили у перехрестя окуляру у діленнях окулярної шкали;

$z$  – ціна одного ділення окулярної шкали, мм;

$L$  – довжина підрахунку (довільної січної), мм.

Однак, не зважаючи на простоту та високу достовірність запропонованих методик об'єктивність результату в значній мірі все ж таки залежить від об'єму масиву даних, кваліфікації спостерігачів, ретельності та акуратності виконання розрахунків.

Для збільшення інформації про морфологію графітної фази можна також використовувати великий масив математичних характеристик: площу вкраплень, їх периметр, кулястість, овальність, еліпсоїдність та ін. Підрахунок цих характеристик може виконуватися за допомогою спеціальних комп'ютеризованих аналізаторів, спеціально адаптованих під чавуни програм (наприклад, РОСА [10], Видео-тест. Структура та ін.), або навіть відкритих комп'ютерних аналізаторів зображень, наприклад Image J. В останньому випадку підрахунок різних морфологічних характеристик не ставить високих вимог до оператора, тривалого терміну навчання і зрозуміло для звичайного середнього користувача комп'ютера.

Розвиток можливостей сучасного лабораторного обладнання надає нові дані про генезис утворення та формування графітової фази у чавунах. Наприклад, метод томографії дозволив досліджувати безпосереднього морфологію графіту у об'ємі чавуну [11].

### Мета роботи

Визначити характерні геометричні параметри кулястих графітних вкраплень за перерізом чавунної заготовки для поршневих кілець.

### Матеріал і методика досліджень

Металографічне дослідження проведено на полірованих мікрошліфах чавуну у трьох зонах перерізу маслотної заготовки: зовнішньої, центральної (посередині заготовки) та внутрішньої.

На відцентровому верстаті отримували циліндричні маслотної заготовки із зовнішнім діаметром 65 мм та довжиною 175 мм.

Хімічний склад маслотної заготовки відповідав марці ВЧ 500-2 (ДСТУ 3925-99) та наведено у табл. 1. Для отримання кулястого графіту на дно нагрітого ковша давали нікель - магнієву лігатуру (15 % Mg) та феросилікобарій ФС65Ба4. Кількість кожної добавки складала біля 1,0 % від маси металу.

Кулястий графіт оцінювали згідно ГОСТ 3443 та за геометричними параметрами. Для цього використовували програмно-апаратний комплекс «ВидеоТест. Структура 5.0» на базі мікроскопу «ZEISS. Epityp-2» з цифровою відеокамерою «Baumer».

**Таблиця 1** – Хімічний склад високоміцного чавуну маслотної заготовки

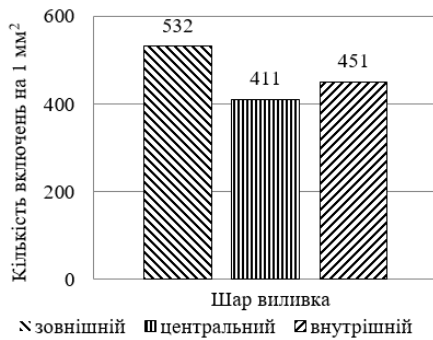
Найменування	Хімічний склад (масова частка), %				
	C	Si	Mn	P	S
Заготовка	3,40	2,60	0,34	0,10	0,02
Марка ВЧ 500 – 2 згідно ДСТУ 3925-99	3,2–3,6	1,9–2,9	0,2–0,9	не більше 0,1	не більше 0,02

Для кожного з 20 параметрів вимірювання визначали наступні статистичні характеристики:

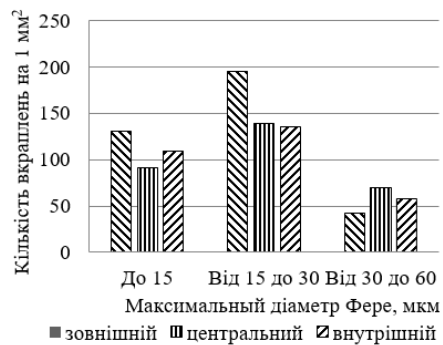
- середнє арифметичне;
- середнє квадратичне відхилення при 95 %-ній вірогідності;
- довірчий інтервал;
- коефіцієнт варіації;
- максимальне та мінімальне значення.

### Результати досліджень

Характерний вид вкраплень графіту у трьох зонах маслотної виливки показаний на рис. 1. На рис. 2–5 наведені результати порівняльного кількісного аналізу вкраплень графіту, їх розподілу за розмірними групами, а також геометричні параметри вкраплень графіту для різних зон відцентрової чавунної заготовки.

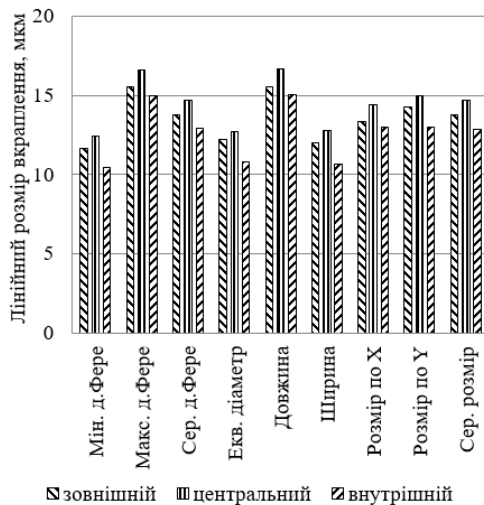


а

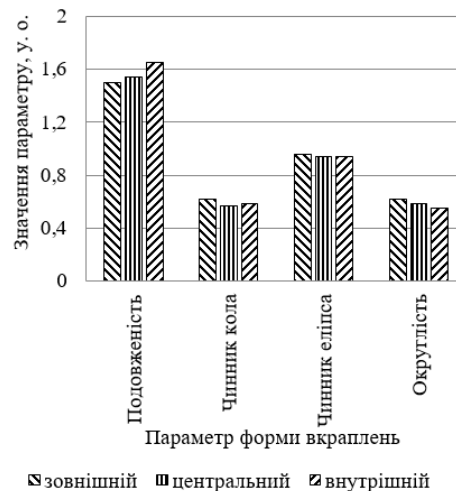


б

**Рисунок 2.** Загальна кількість вкраплень графіту (а) та їх розподіл за розмірними групами ГОСТ 3443 (б) у різних шарах поперечного перерізу відцентрової литої заготовки поршневих кілець

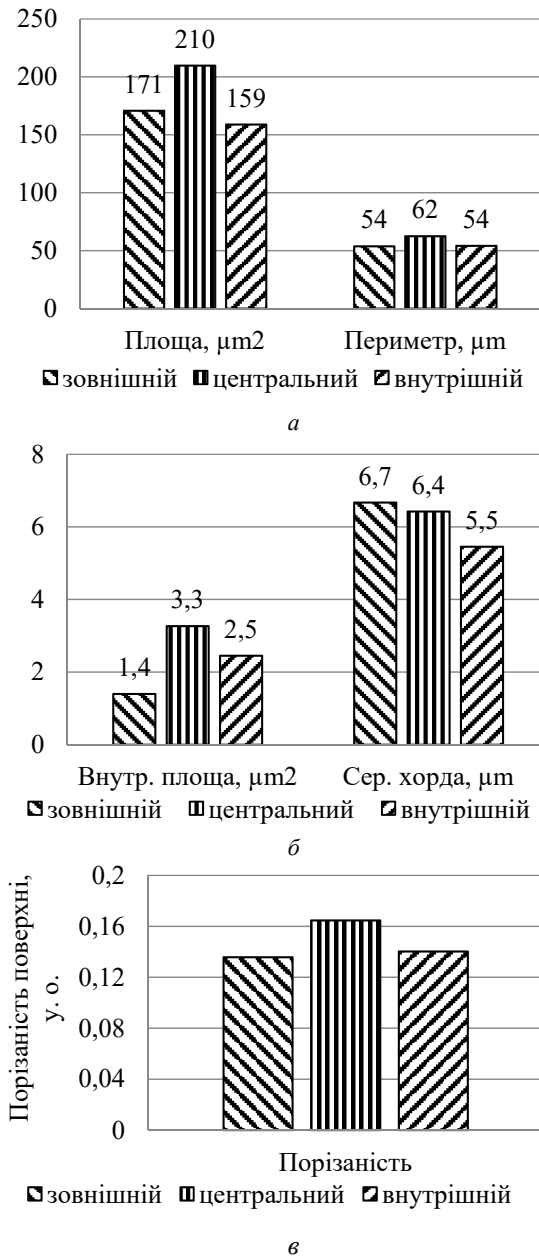


а



б

**Рисунок 3.** Геометричні параметри вкраплень графіту у зовнішньому, центральному та внутрішньому шарі перетину маслотної виливки: а – лінійні розміри вкраплень; б – параметри, що характеризують форму вкраплень

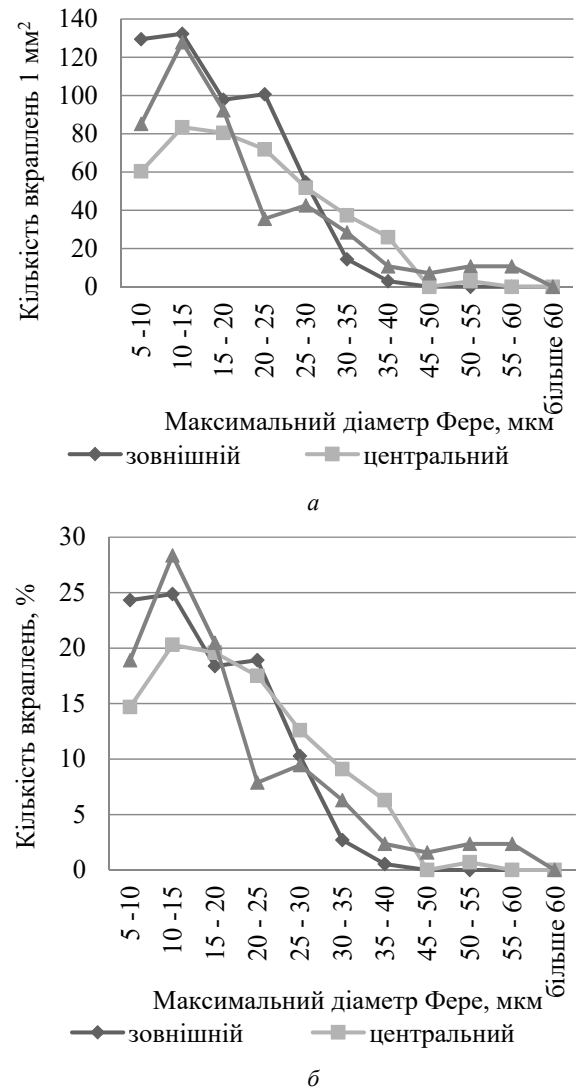


**Рисунок 4.** Порівняння параметрів вкраплень графіту у зовнішньому, центральному та внутрішньому шарі поперечного перерізу виливки

### Обговорення

Встановлено, що за перерізом маслотної заготовки існує суттєва різниця в морфології графітних вкраплень. Вкраплення графіту у внутрішній зоні мають переважно розірвану або компактну форму (рис.1). Кількість вкраплень кулястої форми тут найменша. У зовнішній зоні чавунної заготовки, що контактує з металевою формою, спостерігається найбільша кількість дрібних кулястих вкраплень графіту, ніж в інших зонах.

Слід відмітити, що наведені дані стосуються середніх даних, що вираховувалися програмою автоматично. Деякі параметри (фактор еліпсу, коефіцієнт форми,



**Рисунок 5.** Криві розподілу вкраплень графіту за розмірними групами у зовнішньому, центральному та внутрішньому шарах відцентроволитої заготовки поршневих кілець

ізіраність та ін.) майже однакові для усіх зон заготовки, коефіцієнт варіації для цих показників мають високі значення. Тому дещо втрачається «характерність» показників вкраплень графіту для кожної зони відцентрової заготовки. Точність показань буде зростати при використуванні більшої кількості полів шліфу та зростання об'єму статистичних даних. Також вираховування геометричних параметрів характерних окремих вкраплень графіту із кожної зони відцентрової заготовки дає більш відчутну різницю цих показників.

Поршневі кільця вирізають з центральної частини. В цій зоні спостерігається найкраще сполучення кількості, форми та розподілення графітної фази ніж в інших зонах. Але припуски на механічну обробку повинні бути більшими з внутрішнього боку для усунення негативної морфології графітної фази у цій зоні.

### Висновки

1. Виконано кількісний металографічний аналіз вкраплень графіту у зразках відцентроволитої заготовки поршневих кілець із високоміцного чавуну з визначенням 20-ти геометричних параметрів, що характеризують їх кількість, розміри, форму та порізаність їх поверхні.

2. Проведено порівняльне дослідження геометричних параметрів вкраплень графіту у трьох шарах поперечного перерізу маслотної виливки: зовнішньому, центральному та внутрішньому; виявлено та підтверджено кількісні відмінності в числі, розмірах, формі та ізрізаності поверхні вкраплень графіту в центральному шарі виливки та у шарах, прилеглих до її зовнішньої та внутрішньої поверхні.

3. Побудовано криві розподіли вкраплень за 6-ти розмірними групами ГОСТ 3443 та 11-ти розмірними групами, побудованими в арифметичній прогресії. Встановлено суттєві відмінності зовнішнього та центрального шарів виливки: у 2,14 рази – за кількістю дрібних (5...10 мкм) вкраплень; у 1,59 рази – за кількістю вкраплень розміром 10...15 мкм, у 1,4 рази – за кількістю вкраплень розміром 20...25 мкм; у 3...9 разів – за кількістю великих (понад 35 мкм) вкраплень.

4. У розвиток проведених кількісних досліджень кулястого графіту у відцентровій заготовці поршневих кілець доцільно продовжити набір даних за розмірним складом та іншими параметрами вкраплень графіту та використовувати метод Шайля-Шварца-Салтикова для статистичної реконструкції результатів кількісного аналізу перерізів графіту на площині шліфу.

### Список літератури

1. Александрова, Н. Н. Высококачественные чугуны для отливок [Текст] / под ред. Н. Н. Александрова. - М.: Машиностроение, 1982. – 222 с.

2. Сильман, Г. И. Изготовление и применение поршневых колец из высокопрочного чугуна. Вклад учёных и специалистов в национальную экономику [Текст] / Г. И. Сильман, А. А. Тарасов. – Брянск : Изд-во БГИТА, 2000. – Т. 2. – С. 8–9.

3. Бунин, К. П. Основы металлографии чугуна [Текст] / К. П. Бунин, Я. Н. Малиночка, Ю. Н. Таран. М. : Металлургия. – 1969. – 414 с.

4. Жижкина, Н. А. Структурообразование высоколегированного чугуна в поле действия центробежных сил [Текст] / Н. А. Жижкина. // Металл и литье Украины. – 2012. – № 12. – С. 11–13.

5. Гиршович, Н. Г. Справочник по чугунному литью [Текст] / под ред. Н. Г. Гиршовича. – Л. : Машиностроение, 1978. – 758 с.

6. Салтыков, А. И. Стереометрическая металлография. 3-е изд. [Текст] / А. И. Салтыков. – М. : Металлургия, 1970. – 376 с.

7. Соценко, О. В. Опыт применения методов компьютерной оценки формы графита в чугунах [Текст] / О. В. Соценко, С. Ю. Афонин // Литье. Металлургия. 2014: Материалы X научно-практической конференции (27–29 мая 2014 г., г. Запорожье) / ЗТПП. – Запорожье : Изд-во ЗТПП, 2014. – С. 227–228.

8. Соценко, О. В. Оценка компактности включений графита в высокопрочном чугуне / О. В. Соценко // Литейное производство. – 1982. – № 6. – С. 5–8.

9. Юзвак, В. М. Влияние включений графита на механические свойства чугуна / В. М. Юзвак, И. П. Волчок // Литейное производство. – 1981. – № 2. – С. 7–8.

10. Internetbasierte Klassifikation der Graphitmorphologie mit Hilfe des Stützvektorverfahrens [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www/ URL: http://www.materialography.net/fileadmin/user\\_upload/materialography/Graphitklassifizierung/POCA.pdf](http://www.materialography.net/fileadmin/user_upload/materialography/Graphitklassifizierung/POCA.pdf). - 01.03.2016 г.

11. Velichko, A. Quantitative 3D-Gefügeanalyse – Stereologie oder Tomographie [Text] / A. Velichko, F. Mücklich // Practical Metallography. – 2008. – Vol. 45, № 9. – P. 423–439.

12. Горшков, А. А. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна [Текст] / А. А. Горшков, М. В. Волощенко, В. В. Дубров, О. Ю. Крамаренко; под общ. ред. А. А. Горшкова. – Москва – К. : Машгиз, 1961. – 300 с.

Одержано 05.06.2023

## ANALYSIS OF THE GRAPHITE PHASE IN CENTRIFUGED BILLIONS MADE OF HIGH-QUALITY CAST IRON

Ivanov V.

Dr. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Foundry Machines and Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [ivanov@zntu.edu.ua](mailto:ivanov@zntu.edu.ua), ORCID: 0000-0002-9216-3493

Matveishyn M.

Postgraduate student of the Department of Foundry Machines and Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [nmatveishin@gmail.com](mailto:nmatveishin@gmail.com), ORCID: 0000-0001-6050-310X

**Purpose.** To determine the characteristic geometric parameters of spherical graphite inclusions in the cross-section of a cast iron billet for piston rings.

**Research methods.** A cylindrical blank for piston rings was obtained by the centrifugal method. The chemical composition of the blank according to the ВЧ 500-2 brand (DSTU 3925-99). To obtain spherical graphite, nickel-magnesium ligature (15 % Mg) and secondary graphitizing modification with ferrosilicobarium ФС65Ba4 were used. The amount of each additive was 1.0 % of the metal mass. Spherical graphite was evaluated according to GOST 3443 and several characteristic geometric parameters. A computer image analyzer based on a “ZEISS Epityp-2” microscope with a digital video camera “Baumer” was used.

**Results.** The geometric parameters of graphite inclusions in the cross-section of a centrifugal billet made of high-strength cast iron are examined. A significant difference in the geometric parameters of spherical inclusions of graphite according to several size groups formed in different layers of the cast iron billet obtained by centrifugal casting was established.

**Scientific novelty.** Spherical graphite inclusions in the oil billet are classified according to 6 size groups of GOST 3443 and 11 size groups built in arithmetic progression. Significant differences between the outer and central layers of the casting were established: 2.14 times – by the number of small (5...10 μm) inclusions; 1.59 times – by the number of inclusions with a size of 10...15 μm, 1.4 times – by the number of inclusions with a size of 20...25 μm; 3.9 times – by the number of large (more than 35 μm inclusions).

**Practical value.** A comparative assessment of the morphology of spherical graphite in the outer, central and inner layers of the centered workpiece will allow to improve the technological parameters of the production of cast piston rings in order to ensure a high resource of engines or compressors.

**Key words:** cast iron, spherical graphite, centrifugal casting, piston rings, geometric parameters.

## References

1. Aleksandrova, N. N. (1982) Visokokachestvennie chuhuni dlia otlivok [High quality cast irons]. M.: Mashynostroenye, 222.
2. Sylman, H. Y., Tarasov, A. A. (2000) Yzgotovlenye y pryomenenye porshnevikh kolets yz visokoprochnoho chuhuna. Vklad uchënikh y spetsyalystov v natsyonalnuui ekonomyku [Manufacture and use of piston rings from high-strength cast iron. The contribution of scientists and specialists to the national economy]. Briansk: Yzd-vo BHYTA, T. 2, 8–9.
3. Bunyn, K. P., Malynochka, Ya. N., Taran, Yu. N. (1969) Osnovi metallohrafiyy chuhuna [Fundamentals of cast iron metallography]. M.: Metallurhyia, 414.
4. Zhyzhkyna, N. A. (2012) Strukturnoobrazovanye visokolehyrovannoho chuhuna v pole deistviya tse-trobeznykh syl [Structure formation of high-alloy cast iron in the field of action of centrifugal forces]. Metall y lyte Ukrainy, 12, 11–13.
5. Hyrshovych, N. H. (1978) Spravochnyk po chuhunnomu lytiu [Cast Iron Handbook]. L.: Mashynostroenye. Lenynhr. otdnye, 758.
6. Saltikov, A. Y. (1970) Stereometrycheskaia metallohrafiya. 3-e yzd. [Stereometric metallography]. M.: Metallurhyia, 376.
7. Sotsenko, O. V., Afonyn S. Yu. (2014) Opit pryomeneniya metodov kompiuternoi otsenky formi hrafiyta v chuhunakh [Experience in the Application of Methods for Computer Evaluation of Graphite Shape in Cast Irons]. Lyte Metallurhyia: Materyali X nauchno-praktycheskoi konferentsyy (27 — 29 maia 2014 h., h. Zaporozhe) ZTPP. - Zaporozhe: Yzd-vo ZTPP, 227–228.
8. Sotsenko, O. V. (1982) Otsenka kompaktnosti vklucheniya hrafiyta v visokoprochnom chuhune [Evaluation of the compactness of graphite inclusions in ductile iron]. Lyteinoe proyzvodstvo, 6, 5–8.
9. Iuzvak, V. M., Volchok Y. P. (1981) Vlyianye vklucheniya hrafiyta na mekhanycheskye svoistva chuhuna [Influence of graphite inclusions on the mechanical properties of cast iron]. Lyteinoe proyzvodstvo, 2, 7–8.
10. Internetbasierte Klassifikation der Graphitmorphologie mit Hilfe des Stützvektorverfahrens. Available at: www/ URL: [http://www.materialography.net/fileadmin/user\\_upload/materialography/Graphitklassifizierung/POCA.pdf](http://www.materialography.net/fileadmin/user_upload/materialography/Graphitklassifizierung/POCA.pdf). - 01.03.2016 h.
11. Velichko, A. Mücklich, F. (2008) Quantitative 3D-Gefügeanalyse — Stereologie oder Tomographie [Text]. Practical Metallography, 45(9), 423–439.
12. Horshkov, A. A., Voloshchenko M. V., Dubrov V. V., Kramarenko, O. Yu. (1961) Spravochnyk po yzgotovleniyu otlivok yz visokoprochnoho chuhuna [Ductile Iron Casting Handbook]. Moskva – Kyev : Mash-hyz, 300.