

В. Г. Іванов, канд. техн. наук, доцент (Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна)

# Металографічні дослідження графітних вкраплень у відцентровій заготовці для поршневих кілець

*Рассмотрены морфологические особенности графитовых включений по сечению центробежной заготовки из высокопрочного чугуна. Установлено, что графит во внутренней зоне имеет наиболее искаженную шаровидную форму. Наибольшее количество правильных шаровидных включений наблюдается во внешней зоне, а на самой поверхности преобладают мелкие включения. В центральной зоне наблюдается наилучшее сочетание количества, формы и распределения графитной фазы, чем в других зонах.*

**Ключевые слова:** чугун, шаровидный графит, центробежное литье.

*Розглянуто морфологічні особливості графітних вкраплень за перерізом відцентрової заготовки з високоміцного чавуну. Встановлено, що графіт у внутрішній зоні має найбільш спотворену кулясту форму. Найбільша кількість правильних кулястих вкраплень спостерігається у зовнішній зоні, а на самій поверхні переважають дрібні вкраплення. В центральній зоні спостерігається найкраще сполучення кількості, форми та розподілу графітної фази, ніж в інших зонах.*

**Ключові слова:** чавун, кулястий графіт, відцентрове лиття.

*The morphological features of graphite inclusions in the cross section of the centrifugal workpiece made of high-duty cast iron were examined. It was established, that the graphite in the inner zone has the most distorted spherical shape. The greatest number of regular globular inclusions is observed in the outer zone, but the small inclusions are dominated on the surface. The central zone has the best combination of number, shape and distribution of a graphite phase than that in other zones.*

**Keywords:** grey cast iron, globular graphite, distribution, centrifugal casting.

## Вступ

Розробка сучасних двигунів внутрішнього згорання та компресорів ставить високі вимоги як до матеріалу поршневих кілець, які повинні мати не тільки підвищені фізико-механічні властивості, так і високі службові характеристики, наприклад зносостійкість. Все частіше для виготовлення поршневих кілець застосовують високоміцний чавун [1–3].

Виготовляють поршневі кільця двома способами: з індивідуальних заготовок та з маслот. 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].

Як відомо [1], графіт у чавунах сильніше визначає рівень властивостей ніж металева матриця. Під час відцентрового лиття графіт, що у високоміцному чавуні уявляє собою окремі кулясті

вкраплення, внаслідок меншої щільності ніж металева матриця, нерівномірно розподіляється за перерізом заготовки. Це, у свою чергу, може негативно позначитися на комплексі властивостей. Тому порівняльне оцінювання структури кулястого графіту у зовнішньому, центральному та внутрішньому шарах заготовки дозволяє створити умови для керування комплексом експлуатаційних властивостей литих поршневих кілець з метою забезпечення високого ресурсу двигунів або компресорів.

В останніх публікаціях [3–10] для забезпечення високої однорідності структури металу за перерізом маслотної заготовки та усунення недоліків відцентрового лиття пропонують застосовувати модифікування, покриття на стінки відцентрової форми, що уповільнюють швидку кристалізацію, або пропонують взагалі інші методи отримання кілець.

Відомостей щодо кількісної різниці структури чавуну за перерізом і, особливо, щодо кількісної характери-

стики графітної фази під час відцентрового лиття дуже мало.

## Постановка завдання

У цій статті наводиться кількісне металографічне дослідження графітної фази за перерізом відцентрової маслотної заготовки з високоміцного чавуну.

## Матеріал та методи дослідження

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

Заготовку отримували відцентровим способом. Загальний вигляд заготовки наведено на рис. 1. Хімічний склад маслотної заготовки відповідав марці ВЧ 500–2 (ДСТУ 3925) та наведено у табл. 1. Для отримання кулястого графіту на дно нагрітого ковша давали нікель-магнієву лігатуру (15 % Mg) та феросилікобарій.

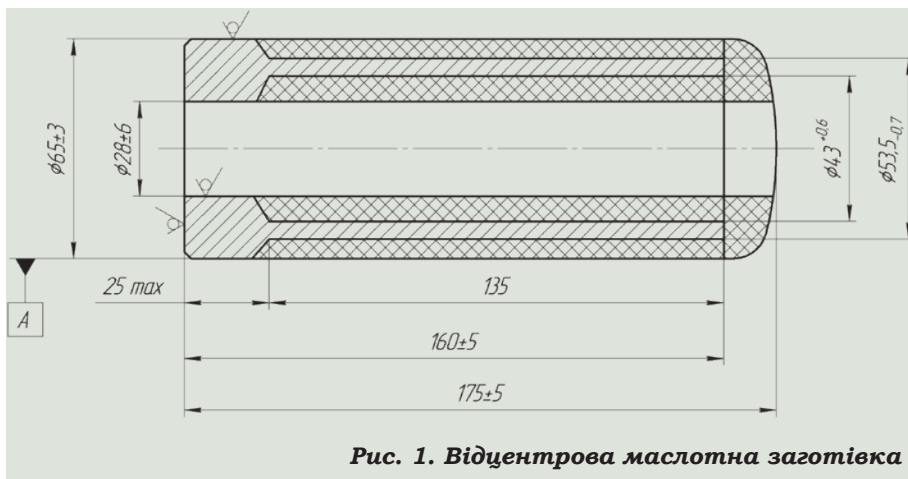


Рис. 1. Відцентрова маслотна заготівка

Таблиця 1. Хімічний склад високоміцного чавуну маслотної заготовки

Найменування	Хімічний склад (масова частка), %				
	Вуглець	Кремній	Марганець	Фосфор	Сірка
Заготівка	3,40	2,60	0,34	0,10	0,02
Марка ВЧ 500-2 згідно до ДСТУ 3925	3,2-3,6	1,9-2,9	0,2-0,9	не більше 0,1	не більше 0,02

Кількість кожної добавки складала біля 1,0 % від маси металу.

Кулястий графіт оцінювали згідно з ГОСТ 3443 та за геометричними параметрами (табл. 2). Для цього використовували програмно-апаратний комплекс «ВідеоТест. Структура 5.0» на базі мікроскопу «ZEISS. Epitup-2» з цифровою відеокамерою «Ваumer».

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.

Також додатково оцінювали фрактальну розмірність кулястих вклучень за допомогою програми Image J. Як показано у роботах [11, 12], фрактальна розмірність може виступати новою кількісною оцінкою форми і морфології графітних вклучень.

Таблиця 2. Параметри, за якими оцінювали кулястий графіт

Параметр	Визначення параметру
1 Площа, $\text{мкм}^2$	Площа вклучень графіту
2 Внутрішня площа, $\text{мкм}^2$	Сумарна площа внутрішніх порожнин у вклученнях
3 Периметр, $\text{мкм}$	Сумарний периметр вклучень та внутрішніх порожнин
4 Мінімальний діаметр Фере, $\text{мкм}$	Мінімальне, максимальне та середнє значення проекції вклучення у різних напрямках через кожні $15^\circ$ за віссю X
5 Максимальний діаметр Фере, $\text{мкм}$	
6 Середній діаметр Фере, $\text{мкм}$	
7 Еквівалентний діаметр, $\text{мкм}$	Діаметр (D) круга, еквівалентного за площею (A) вклученню, що вимірюють: $D = \sqrt{4A/\pi}$
8 Довжина, $\text{мкм}$	Максимальний габаритний розмір вклучення
9 Ширина, $\text{мкм}$	Максимальний розмір вклучення, виміряний перпендикулярно його довжині
10 Розмір за X, $\text{мкм}$	Довжина проекції вклучення на вісь X
11 Розмір за Y, $\text{мкм}$	Довжина проекції вклучення на вісь Y
12 Середня хорда, $\text{мкм}$	Середнє значення довжин усіх хорд, що перерізають вклучення паралельно вісі X
13 Подовженість, відносна одиниця	Відношення довжини до ширини вклучення
14 Середній розмір, $\text{мкм}$	Півсума довжини та ширини вклучення
15 Фактор круга, відносна одиниця	Характеризує близькість форми до круга: $F_k = \frac{4\pi A}{P^2}$ , де A – площа, P – зовнішній периметр вклучення
16 Фактор еліпсу, відносна одиниця	$F_k = \frac{A}{ab\pi}$ , де a, b – вісі еліпсу, що описаний навколо
17 Округлість, відносна одиниця	Відношення площі (A) вклучення до площі круга з максимальним діаметром Фере (f)
18 Зовнішній периметр, $\text{мкм}$	Периметр вклучення (без врахування внутрішніх порожнот)
19 Коефіцієнт форми	Відношення площі вклучення до квадрату периметру
20 Зрізаність, відносна одиниця	Шорсткість поверхні вклучення

## Результати

Характерні структури чавуну за перерізом маслотної заготовки наведені на рис. 2.

Кількісний порівняльний аналіз включень графіту за зонами маслотної заготовки надані у табл. 3.

Параметри вимірювання вкраплень графіту у різних зонах відцентрової заготовки наведені у табл. 4. Для визначення параметрів вибиралися по 10 характерних полів шліфу для кожної зони заготовки.

## Аналіз результатів

З наведених даних встановлено, що за перерізом маслотної заготовки існує різниця в морфології графітних вкраплень. Це обумовле-

уповільненої швидкості охолодження формування графіту протікає в цій зоні найдовше, ніж в інших. Вкраплення графіту у внутрішній зоні мають переважно розірвану або компакту форму. Кількість включень кулястої форми в цій зоні найменша.

У зовнішній зоні чавунної заготовки, що контактує з металевою формою, спостерігається найбільша кількість дрібних кулястих вкраплень графіту, ніж в інших зонах. Поверхневий шар товщиною 2–3 мм не враховувався під час вимірювання геометричних параметрів, що наведені у табл. 4.

Розподілення включень графіту розміром більш 5 мкм за одинадцятьма розмірним групам, відрізняється від шести розмірних

ливка характеризуються більш високими числовими значеннями, ніж в інших частинах. Це можна пояснити тим, що у центральній зоні включення графіту переважно залишаються кулястими, але під дією відцентрових сил вони вже починають руйнуватися, з'являються розриви та порушується суцільність вкраплень. У внутрішній зоні розміри вкраплень графіту дещо менші внаслідок руйнування кулястих вкраплень.

Слід відмітити, що наведені дані стосуються середніх даних, що розраховувалися програмою автоматично. Деякі параметри (фактор еліпсу, коефіцієнт форми, ізрізаність та ін.) майже однакові для усіх зон заготовки, коефіцієнт варіації для

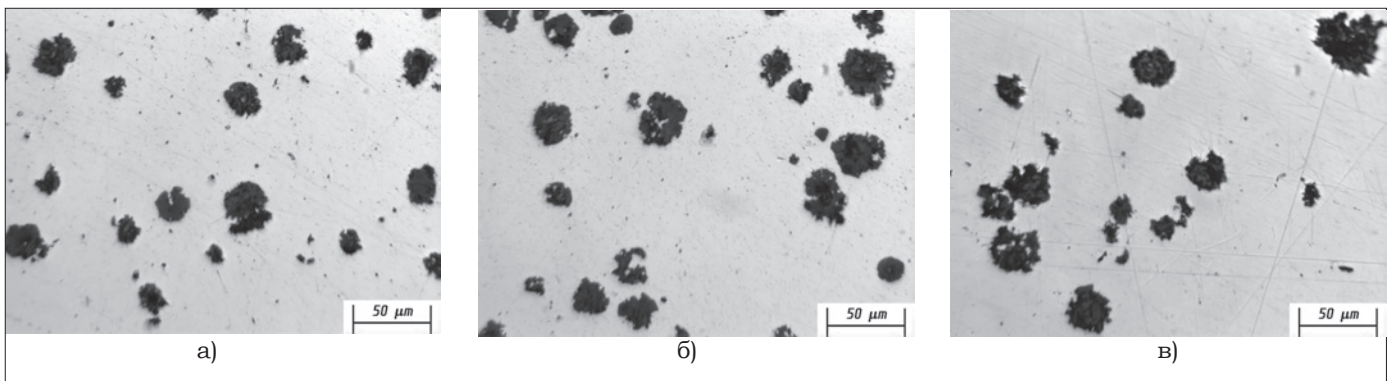


Рис. 2. Характерні графітові вкраплення за перерізом відцентрової маслотної заготовки ( $\times 500$ ): а) – зовнішня зона; б) – центральна зона; в) – внутрішня зона

Таблиця 3. Морфологічний порівняльний аналіз включень графіту за зонами маслотної заготовки згідно до ГОСТ 3443

Зона маслотної заготовки	Показники графіту						
	Кількість форми вкраплень графіту за розмірними групами, %					Розподілення	Кількість вкраплень, %
	ШГф4, ШГд25	ШГф3, ШГд45	ШГф2, ШГд25	ШГф2, ШГд45	Інші		
Зовнішня	42,9	33,6	21,5	-	2,0	ШГр1	ШГ10
Центральна	28,0	40,0	27,8	-	4,1	ШГр1	ШГ10
Внутрішня	20,6	35,3	-	33,2	10,8	ШГр1	ШГ10

но умовами кристалізації та формування графітних вкраплень під час дії відцентрових сил. Крупні включення графіту повинні відтіснятися до вільної внутрішньої поверхні. Під дією відцентрових сил ці вкраплення спотворюються. Внаслідок

груп згідно ГОСТ 3443 (табл. 2) більш рівномірним розподіленням (рис. 3).

Лінійні розміри вкраплень графіту, параметри форми, а також площа, периметр та ізрізаність (шорсткість) поверхні вкраплень графіту у центральному шарі ви-

щих показників мають високі значення. Тому дещо втрачається «характерність» показників вкраплень графіту для кожної зони відцентрової заготовки. Точність показань буде зростати під час використання 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.

Оцінка фрактальної розмірності діаметрального перетину включень графіту з кожної зони маслотної заготовки, підтвердили, що найбільше її значення ( $D=1,84$ ) відповідає включенням у зовнішній зоні, дещо менше – у центральній зоні ( $D=1,82$ ) і найменше значення було у внутрішній зоні ( $D=1,76$ ).

Поршневі кільця отримують з центральної частини заготовки. 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.

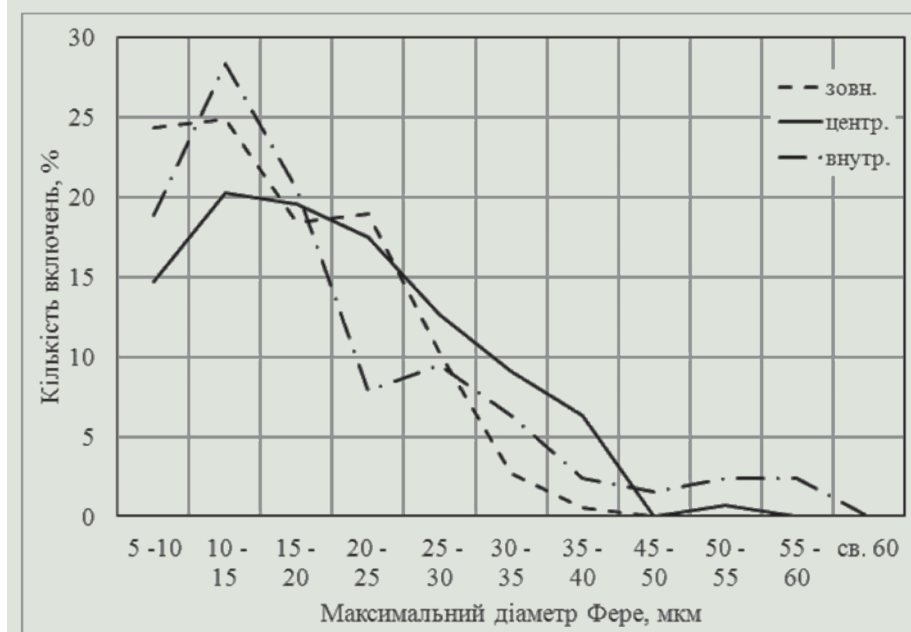
Подальше покращення властивостей поршневих кілець пов'язано з вдосконаленням властивостей металевої матриці за рахунок оптимального легування, модифікування та проведення термічної обробки. Цьому напрямку будуть присвячені наступні дослідження.

## Висновки

1. Виконано кількісний металографічний аналіз вкраплень графіту у зразках відцентрової заготовки поршневих кілець з високоміцного чавуну з визначенням 20-ти геометричних параметрів вкраплень, що характеризують їх кількість, розміри, форму. Також визначено фрактальну розмірність вкраплень графіту за перетином заготовки.

2. Проведено порівняльне дослідження геометричних параметрів вкраплень графіту у трьох шарах поперекового перерізу маслотної заготовки: зовнішньому, центральному, внутрішньому; виявлено та підтверджено кількісно різницю у числі, розмірах, формі та шорсткості поверхні вкраплень графіту у центральному шарі вилівка та у шарах, що прилягають до її зовнішньої та внутрішньої поверхні.

3. Побудовані криві розподілення вкраплень графіту за 11-ма розмірним групам, що



**Рис. 3. Криві розподілення вкраплень графіту за розмірними групами у зовнішньому, центральному та внутрішньому шарах відцентрової заготовки поршневих кілець**

побудовані у арифметичній прогресії. Встановлені суттєві розбіжності зовнішнього та центрального шарів вилівка за кількістю дрібних (5–10 мкм), середніх (15–25 мкм) та крупних (більш 35 мкм) вкраплень.

4. Встановлено, що подальше вдосконалення отримання якісних поршневих кілець пов'язане із застосуванням більш міцної металевої матриці, що забезпечують оптимальним легуванням, модифікуванням та термічною обробкою.

## Список літератури:

1. Справочник по чугуному литью / под ред Н. Г. Гиршовича. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 758 с.
2. Молдованов В. П. Производство поршневых колец двигателей внутреннего сгорания / В. П. Молдованов, А. Р. Пикман, В. Х. Авербух. – М.: Машиностроение, 1980. – 199 с.
3. Юдин С. Б. Центробежное литье / С. Б. Юдин, М. М. Левин, С. Е. Розенфельд. – М.: Машиностроение, 1972–280 с.
4. Дуковский А. М. Особенности центробежного литья заготовок поршневых колец, для тепловых дизелей / А. М. Дуковский, Б. М. Асташкевич // Литейное производство 1996. – № 6. – С. 18–19.

5. Боровик М. В. Состав та структура високоміцного чавуну в відливках поршневих кілець / М. В. Боровик, І. О. Шинський, О. О. Токарева, Л. А. Рабіччук // Металознавство та обробка матеріалів. – 2004. – № 2. – С. 44–47.

6. Шинский О. И. Регулирование литой структуры ЧШГ в центробежнолитых заготовках / О. И. Шинский, В. И. Литовка, Н. В. Боровик // Литейщик России. – 2002. – № 6. – С. 23–28.

7. Крутилин А. Н. Анализ существующих способов получения заготовок поршневых колец / А. Н. Крутилин, А. И. Станюк, Д. И. Станюк // Литье и металлургия. – 2005. – № 3. – С. 33–36.

8. Крутилин А. Н. Разработка принципиальной схемы процесса литья заготовок поршневых колец [Текст] / А. Н. Крутилин, А. И. Станюк, Д. И. Станюк // Литье и металлургия. – 2005. – № 3. – С. 43–46.

9. Бевза В. Ф. Маслотное заготовки для изготовления поршневых колец / В. Ф. Бевза, В. А. Мазько // Литье и металлургия. – 2008. – № 2. – С. 13–14.

10. Петраков О. В. Особенности внутриформенного модифицирования при литье маслотно-заготовок / О. В. Петраков, К. В. Макаренко // Заготовительные производства в машиностро-



Таблиця 4. Результати вимірювання кількісних параметрів включень графіту за зонами відцентрової заготовки

Параметр	Середнє значення параметру для відповідних зон заготовки		
	зовнішня	центральна	внутрішня
1 Площа, $\text{мм}^2$	170,72	209,68	158,92
2 Внутрішня площа, $\text{мм}^2$	1,40	3,27	2,45
3 Периметр, $\text{мм}$	53,79	62,47	54,20
4 Мінімальний діаметр Фере, $\text{мм}$	11,63	12,45	10,43
5 Максимальний діаметр Фере, $\text{мм}$	15,51	16,64	14,98
6 Середній діаметр Фере, $\text{мм}$	13,78	14,69	12,92
7 Еквівалентний діаметр, $\text{мм}$	12,21	12,73	10,81
8 Довжина, $\text{мм}$	15,54	16,68	15,05
9 Ширина, $\text{мм}$	12,01	12,77	10,66
10 Розмір за X, $\text{мм}$	13,34	14,44	12,97
11 Розмір за Y, $\text{мм}$	14,30	14,98	12,97
12 Середня хорда, $\text{мм}$	6,67	6,42	5,45
13 Подовженість, відносна одиниця	1,50	1,54	1,65
14 Середній розмір, $\text{мм}$	13,77	14,73	12,86
15 Фактор круга, відносна одиниця	0,62	0,57	0,58
16 Фактор еліпсу, відносна одиниця	0,95	0,94	0,94
17 Округлість, відносна одиниця	0,62	0,59	0,55
18 Зовнішній периметр, $\text{мм}$	50,66	56,54	49,65
19 Коефіцієнт форми	0,05	0,05	0,05
20 Ізрізаність, відносна одиниця	0,14	0,16	0,14

ени (кузнечно-штамповочное, литейное и другие производства). – 2009. – № 6. – С. 8–10.

11. Соценко О. В. Фрактальна структура кулястого графіту у високоміцному чавуні / О. В. Соценко // *Металознавство та об-*

*робка металів.* – 2009. – № 3. – С. 18–24.

12. Макаренко К. В. Фрактальний аналіз структурообрання чугунов: монографія / К. В. Макаренко. – Брянск: БГТУ, 2013. – 92 с.

**Автор висловлює глибоку подяку науковим співробітникам ДП «УкрНДІспецсталь»: канд. техн. наук Р. В. Яценко та М. Ю. Яценко за допомогу під час проведення цих досліджень.**