

УДК 669.017.16:62-242.3-034.13

Канд. техн. наук В. Г. Іванов

Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ З ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ ПІСЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ У ДВОТАКТНОМУ ДВИГУНІ

Підтверджено, що троостомартенситна структура високоміцного чавуну з рівномірно розподіленим дрібним кулястим графітом забезпечують необхідні експлуатаційні властивості поршневих кілець для двотактних двигунів.

Встановлено, що структура та твердість поршневих кілець з високоміцного чавуну майже не змінюються під час рядової експлуатації у двотактних двигунах з хромованим циліндром. Якщо є небезпека роботи двигунів у критичних умовах, що супроводжуються значними перегрівками, то найбільш бажаною структурою слід визнати перлітну, як більш стабільну ніж бейнітну або мартенситну.

Ключові слова: високоміцний чавун, поршневі кільця, структура, перліт, мартенсит.

Вступ

Поршневі кільця відносяться до відповідальних деталей двигунів, багато в чому визначаючи їх експлуатаційні показники та ресурс. Тому забезпечення оптимальної стабільної структури поршневих кілець створює значний резерв для підвищення їх службових властивостей та є актуальною задачею машинобудування.

Огляд літератури. Найчастіше поршневі кільця виготовляють зі спеціальних сірих або високоміцних чавунів з пластинчастим та кулястим графітом відповідно [1].

Заготовки для поршневих кілець отримують різними способами лиття: з індивідуальних заготовок та з циліндричних заготовок – маслот. У масовому виробництві поршневих кілець діаметром до 500 мм переважно використовують відцентровий спосіб лиття маслот [2]. Для зменшення відходів на механічну обробку маслотних заготовок пропонують також нові перспективні способи лиття заморожуванням [3–5]. Але ці методи поки не набули широкого вжитку і відцентровий спосіб залишається найбільш розповсюдженим у практиці ливарних цехів, не зважаючи на його окремі недоліки.

З високоміцних чавунів, як правило, виготовляють найбільш напружені верхні компресійні кільця, які повинні мати високу зносостійкість, міцність, пружність, а також добре оброблятися різанням. Причому структура і властивості не повинні змінюватися при експлуатації [6–8].

Існуючими нормативними документами обумовлюються відповідні вимоги до структури високоміцного чавуну та його властивостей [1]:

- графітові вкраплення повинні мати кулясту форму (дозволяється наявність окремих вкрап-

лень пластинчастого графіту не більш 10 % від загальної кількості) та рівномірно розподілятися у металевій матриці;

- металева основа повинна складатися із сорбітоподібного і тонкопластинчастого перліту (дозволяється троостомартенсит і бейніт);

- навколо графітових вкраплень дозволяється феритна оторочка (не більш 10 % площі шліфа), а також наявність цементиту у вигляді окремих дрібних вкраплень (не більш 10 % площі шліфа);

- межа міцності повинна бути $(98-108) \cdot 10^7$ Н/м² або 100–110 кгс/мм²;

- твердість кілець повинна бути 98–112 HRB, для двигунів автомобілів, мотоциклів, мопедів не нижче 100 HRB, при цьому різниця твердості у межах одного кільця не повинна перевищувати 4 одиниць HRB.

Потрібну структуру металевої основи досягають дотриманням необхідного хімічного складу та відповідної термічної обробки [6–8].

Кулястий графіт отримують за допомогою спеціальних лігатур, що містять магній [8]. Рівномірно розподілений кулястий графіт при добре налагодженому технологічному процесі стабільно отримується відцентрованим способом лиття маслотних заготовок [9–11]. Але відцентровий спосіб лиття маслот поршневих кілець характеризується високою небезпекою формування небажаних структур, що містять карбіди, також вносячи певні труднощі з визначенням оптимального складу чавунів та режимів їх термічної обробки.

Найчастіше високоміцні чавуни для поршневих кілець піддають поліпшенню (гартуванню з високим відпуском) або штучному старінню і

термофіксації. Також перспективною термічною обробкою є ізотермічне гартування із забезпеченням бейнітної структури [8]. Але літературні дані по цьому питанню дещо суперечливі, що може пояснюватися різницею умов експлуатації та методик проведення експериментів. І нерідко, наведені режими термічної обробки не забезпечують необхідну зносостійкість і, відповідно, необхідний ресурс двигуна.

Бейнітні та мартенситні структури іноді, забезпечуючи необхідну зносостійкість, не відповідають необхідному рівню міцності, зокрема на згинання. Крім того, бейнітні та мартенситні структури є метастабільними, здатні до перетворення при високотемпературній експлуатації і не дають стабільності властивостей. Підвищення стійкості цих структур за рахунок легування визнають нераціональним, бо це приводить до збільшення собівартості поршневих кілець [12–14].

Перспективним та економічним методом вважається отримання бейнітної чи аусферитної структури зразу у литому стані, застосовуючи раннє вибивання виливків при температурі 850–1000 °С, їх гартування шляхом швидкого охолодження та перенесення у середовище з постійно нагрітим до 300–500 °С піском. Але такий метод має обмежене використання [15].

Крім того, лита структура маслотної заготовки не повинна суттєво утруднювати їх механічну обробку. В літературі цьому питанню не приділяється достатньої уваги, у зв'язку з чим, визначення оптимальної структури високоміцного чавуну маслотної заготовки поршневих кілець з метою забезпечення найкращого сполучення фізико-хімічних та експлуатаційних властивостей при найменших витратах залишається не зовсім з'ясованим і потребує додаткових досліджень.

Постановка задачі

В цій роботі вивчали структуру поршневих кілець з високоміцного чавуну до і після експлуатації у двотактних бензинових двигунах великої потужності (до 30 кВт).

Матеріали і методи

Для дослідження використовували поршневі кільця, що відповідали за хімічним складом високоміцному чавуну марки ВЧ 500-2 (ДСТУ 3925-99).

Плавку чавуну проводили у високочастотній індукційній печі з кислотою футерівкою місткістю 30 кг. У якості шихти використовували переробний чавун марки ПЛ-2, чавунний та сталевий брутх, феросиліцій ФС45. Для отримання кулястого графіту на дно нагрітого ковша давали нікель-магнієву лігатуру (15 % Mg, 0,6 % Се), що попередньо виготовляли з електролітичного нікелю, первинного магнію та фероцерію під барієвим флюсом. Зверху лігатуру вкривали шаром феросилікобарію ФС65Ba4. Кількість добавок складала 1,0 % від маси рідкого металу.

На відцентровому верстаті отримували циліндричні маслотної заготовки із зовнішнім діаметром 65 мм та довжиною 175 мм, з яких потім вирізалися поршневі кільця згідно прийнятої технології. Готові кільця піддавали гартуванню при 900 °С з наступним високим відпуском при 600 °С. З придатних поршневих кілець готували шліфи для металографічного аналізу, який проводили з використанням мікроскопів МИМ-8 та Axiovert 200 MAT. Оцінку кулястого графіту здійснювали згідно ГОСТ 3443. Твердість вимірювали методом Роквелла за шкалою HRB на установці ТК-2.

Також досліджували декілька десятків аналогічно виготовлених поршневих кілець, що були у експлуатації на двотактних бензинових двигунах та вилучалися з них під час ремонту. Усі поршневі кільця працювали в алюмінієвих циліндрах з хромованим покриттям. Причинами ремонту найчастіше були падіння потужності двигунів та заклинювання поршню.

Результати

На рис. 1, 2 наведені типові мікроструктури зразків чавунних поршневих до і після експлуатації, а у табл. 1 показники їх структури та твердості.

Таблиця 1 – Структура та твердість типових поршневих кілець з високоміцного чавуну

Структура згідно	Показники структури				Твердість HRB, одиниці	
	за графітом			за металевою основою		
	форма	розміри	розподіл			
ГОСТ 621-87	ШГф2 – ШГф5	-	ШГр1	-	сорбітоподібний дрібнопластинчастий перліт, троостомартенсит, бейніт	98-112
рис. 1, 2 а	ШГф3	ШГд15	ШГр1	ШГ6	троостомартенсит	105-106
рис. 1, 2 б	ШГф4	ШГд25	ШГр2	ШГ6	троостомартенсит	105-108
рис. 1, 2 в	ШГф5	ШГд25	ШГр1	ШГ6	троостомартенсит	105-109
рис. 1, 2 г	ШГф5, ВГф3	ШГд15	ШГр1, ВГр1	ШГ6, ВГ70	сорбітоподібний перліт та ферит	100-105

Примітка. Різниця показників твердості в межах одного кільця згідно ГОСТ 621-87 не повинна перебільшувати 4 одиниць HRB.

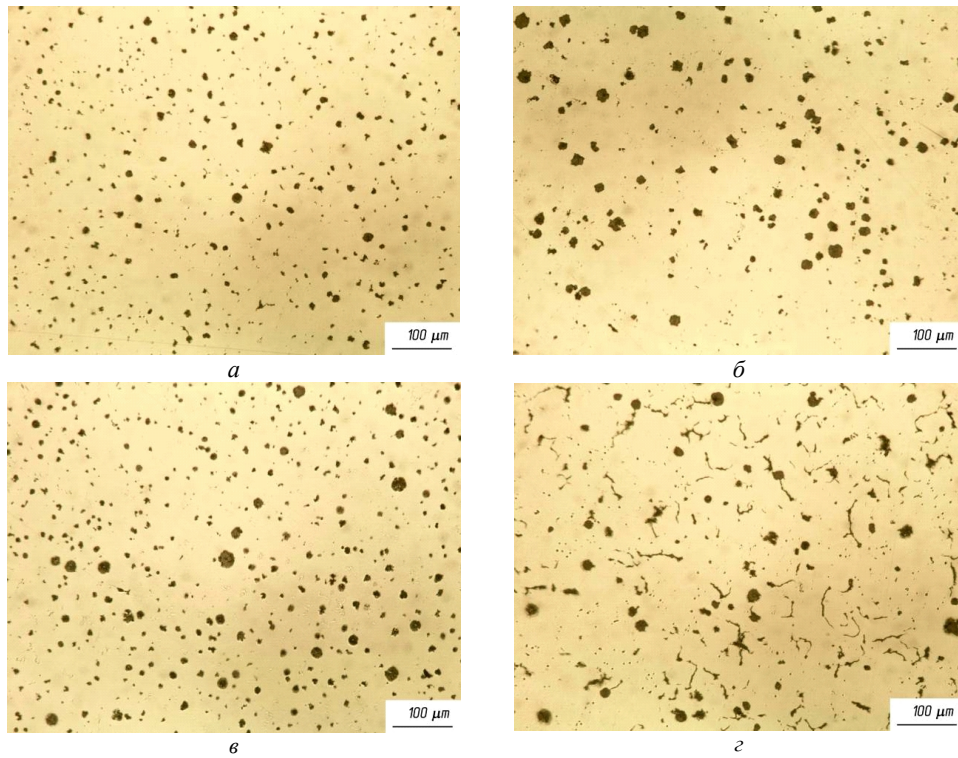


Рис. 1. Вкраплення графіту у поршневих кільцях з високоміцного чавуну до (а) і після експлуатації (б–г) у двотактних бензинових двигунах

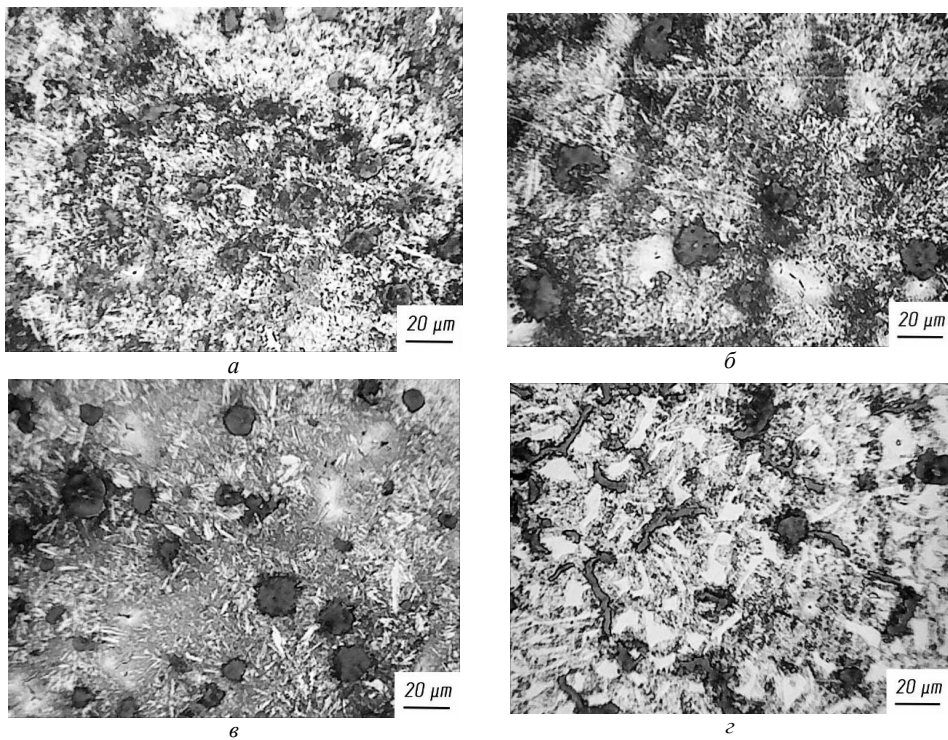


Рис. 2. Типова мікроструктура поршневих кільць з високоміцного чавуну до (а) і після експлуатації (б–г) у двотактних бензинових двигунах

Обговорення

Як видно з наведених даних, мікроструктура поршневих кілець та стан графітної фази суттєво різняться, не зважаючи, що усі кільця були одного типорозміру, виготовлені за однією технологією та працювали на аналогічних двигунах бензопил.

Спостерігався кулястий графіт різної компактності, форми, розподілу та розмірів (рис. 1 *a, б, в* та табл. 1). Поряд з кулястим графітом в деяких кільцях спостерігався і вермикулярний графіт, частка якого могла складати більше 50 % (рис. 1 *г*).

Слід відмітити, що суттєвих змін у мікроструктурі поршневих кілець після експлуатації майже не спостерігалось (рис. 2 *a–в*), за деякими виключеннями (рис. 2 *г*). Такі зміни, вірогідно, можуть відбуватися тільки, якщо двигун перегрівався під час експлуатації. Аналогічно видно, що експлуатація майже не змінює твердості кілець. Найбільша різниця, більше 4-х одиниць HRB, спостерігалася тільки у кілець зі структурними змінами (рис. 2 *г*). Структура поршневих кілець до і після експлуатації була троостомартенситною або сорбітною. Зустрічалася також бейнітна структура.

Якщо двигун перегрівався до високих температур, то спостерігалася наявність вже структур розпаду та поява певної доли фериту. Суттєве перегрівання поршневих кілець може відбуватися в разі їх поганого прилягання до стінок хромованого циліндру, в результаті чого вони пропускають вихлопні гази та погано віддають тепло циліндру.

Як показали додатково проведені дослідження та за даними інших авторів [16] температура у зоні поршневих кілець при нормальних умовах експлуатації не перевищує 300–350 °С. Тому зміни у структурі та твердості майже не відбуваються або відбуваються дуже повільно. При перегрівках двигуна, які можуть бути викликані відхиленнями у експлуатації (нестачею змащування, детонацією, проривом вихлопних газів тощо), відбувається розпад мартенситу, перліту або інших метастабільних структур, що містять цементит, відбувається падіння твердості, погане прилягання до стінок циліндру, знижується компресія та відбувається падіння потужності двигуна. В крайньому випадку можливо руйнування кільця та заклинювання поршню.

Висновки

Таким чином, високоміцний чавун з перлітною або троостомартенситною структурою та рівномірно розподіленим кулястим графітом при нормальних умовах експлуатації забезпечує необхідний ресурс двотактних бензинових двигунів. Резерв збільшення ресурсу експлуатації поршневих кілець знаходиться у забезпеченні рівно-

мірно розподіленого та дрібного кулястого графіту у металевій матриці, яка може бути перлітною або бейнітною. Для забезпечення економії енергетичних ресурсів перспективним слід визнати отримання необхідної структури у литому стані, застосовуючи ранню вибивку та регульоване охолодження. Для двотактних двигунів, що працюють в критичних умовах і мають високу небезпеку до перегрівів, оптимальною металевою матрицею слід визнати перлітну, як більш стабільну ніж бейнітну чи мартенситну. Підвищити стабільність металевої основи високоміцних чавунів можна також шляхом застосування економного легування міддю, нікелем, хромом та ін. елементами. Але це є темою окремого дослідження.

Список літератури

- ГОСТ 621-87. Кольца поршневые двигателей внутреннего сгорания. Общие технические условия. – Введ. 1989-01-01. М. Изд-во стандартов, 1987. – 34 с.
- Справочник по чугуному литью / под ред Н. Г. Гиршовича. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1978. – 758 с.
- 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.
- Крутилин, А. Н. Разработка принципиальной схемы процесса литья заготовок поршневых колец / А. Н. Крутилин, А. И. Станюк, Д. И. Станюк // *Литье и металлургия*. – 2005. – №3. – С. 43 – 46.
- Бевза, В. Ф. Маслотноы заготовки для изготовления поршневых колец / В. Ф. Бевза, В. А. Мазько // *Литье и металлургия*. – 2008. – №2. – С. 13–14.
- Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенито-бейнитной матрицей – современные материалы для литых деталей. (Свойства, применение, особенности технологии) : информационный сборник № 2 // Инженерно-технологический центр машиностроения «Металлург». – М. : ИТЦМ «Металлург», 2004. – 440 с.
- Славин Д. О. Металлы и сплавы в химическом машиностроении и аппаратостроении: справочник / Д. О. Славин, Е. Б. Штейман. – М. : Машгиз, 1951. – 286 с.
- Шебадинов М. П. Высокопрочный чугун в автомобилестроении / М. П. Шебадинов, Ю. Е. Абраменко, И. Н. Бех. – М. : Машиностроение, 1988. – 216 с.
- Іванов В. Г. Металографічні дослідження графітних вкраплень у відцентровій заготовці для поршневих кілець / Іванов В. Г. // *Компресорное и энергетическое машинострое-*

- ние. – 2016. – № 1. – С. 40–44.
10. Склад та структура високоміцного чавуну в відливках поршневих кілець / М. В. Боровик, І. О. Шинський, О. О. Токарева, Л. А. Рабійчук // Металознавство та обробка матеріалів. – 2004. – № 2. – С. 44–47.
 11. Шинский О. И. Регулирование литой структуры ЧШГ в центробежнолитых заготовках / О. И. Шинский, В. И. Литовка, Н.В. Боровик // Литейщик России. – 2002. – № 6.
 12. Бейнитный высокопрочный чугун с шаровидным графитом / Г. И. Сильман, К. В. Макаренко, В. В. Камынин, Е. А. Зенцова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2013. – № 4. – С. 3–8.
 13. Повышение прочностных свойств графитизированных чугунов / К.В. Макаренко, Е. А. Зенцова, Р. А. Богданов, Р. А. Филипов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – № 9. – С. 3–6.
 14. Сильман Г. И. Графитизированные чугуны / Г. И. Сильман, К. В. Макаренко // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 2. – С. 3–10.
 15. Дорошенко В. С. О свойствах аусферритного ЧШГ и его получении литьем по газифицируемыми моделям с изотермической закалкой с литого состояния / Дорошенко В. С. // Спеціальна металургія : вчора, сьогодні, завтра [Електрон. ресурс] : матеріали XV Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 11 квітня 2017 р. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – С. 404–420.
 16. Pistons and engine testing: ATZ/MTZ-Fachbuch / MAHLE GmbH (eds.). – 2-nd edition. – Springer Vieweg, 2016. – 305 p.

Поступила в редакцію 10.05.2017

Иванов В.Г. Исследование структуры поршневых колец из высокопрочного чугуна после эксплуатации в двухтактных двигателях

Подтверждено, что троостомартенситная структура высокопрочного чугуна с равномерно распределенным мелким шаровидным графитом обеспечивают необходимые эксплуатационные свойства поршневых колец для двухтактных двигателей.

Установлено, что структура и твердость поршневых колец из высокопрочного чугуна почти не меняются во время рядовой эксплуатации в двухтактных двигателях с хромированным цилиндром. Если есть опасность работы двигателей в критических условиях, сопровождающихся значительными перегревами, то наиболее желательной структурой следует признать перлитную, как более стабильную, чем бейнитную или мартенситную.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, поршневые кольца, структура, перлит, мартенсит.

Ivanov V. Research of the structure of piston rings from ductile iron after exploitation in two-stroke engines

It is confirmed that the fine troostite – martensite structure of ductile iron with uniformly distributed small globular graphite provides the required performance properties of piston rings for two-stroke engines.

It was determined that the structure and hardness of ductile iron piston rings almost does not change during the ordinary operation in two-stroke engines with chromium-plated cylinder. If there is a hazard in engine operation under critical conditions involving significant overheating, the pearlite structure should be recognized as the most desirable one and more stable compared to beynite or martensite ones.

Key words: ductile iron, piston rings, structure, perlite, martensite.