

Вплив O, N і H на структуру металевої основи сірого чавуну у виливках кілець-заготовок поришневих кілець

Борисенко А. Ю., доктор технічних наук, старший науковий співробітник, asbor75@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2120-0944>

Молчанов Л. С., кандидат технічних наук, завідувач відділу, metall729321@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6139-5956>

Голуб Т. С., кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, isinasu.golubts@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна

Вивчено вплив кисню, азоту та водню на структуру металевої основи виливків кілець-заготовок поришневих кілець діаметром 110 і 130 мм із сірого чавуну, виготовлених із шихти на основі доменного чавуну різних підприємств. Проведено комплексний кореляційний аналіз значущості впливу діаметра виливків кілець-заготовок та їх хімічного складу на утворення бейніто-мартенситної структури металевої основи сірого чавуну. Показано, що кисень, азот і водень чинять складний комплексний вплив на стійкість аустеніту до розпаду при переохолодженні, але діють вони однаково – у бік його стабілізації, сприяючи загартуванню сірого чавуну. Мінімальна сумарна кількість кисню, азоту і водню призводить до часткового вибілу чавунних виливків кілець-заготовок поришневих кілець діаметром 110 та 130. На структуру металевої основи сірого чавуну у виливках кілець-заготовок діаметром 110 і 130 мм має більший вплив, ніж азот і водень, які різною мірою посилюють цей ефект. Різниця у швидкості охолодження виливків кілець-заготовок поришневих кілець діаметром 110 і 130 мм практично не впливає на утворення гартівної бейніто-мартенситної структури. Вуглець не надає значного впливу на схильність чавуну до загартування. Серед легуючих та домішкових елементів найбільший вплив на утворення бейніто-мартенситної структури у виливках кілець-заготовок поришневих кілець діаметром 110 і 130 мм із сірого чавуну чинять марганець, сірка, фосфор та нікель. Підвищений вміст газів, особливо кисню, що надходять із шихтових матеріалів, в першу чергу з доменного чавуну, у разі відсутності рафінування розплаву за інших рівних умов ведення плавки є основною причиною утворень гартівної бейніто-мартенситної структури металевої основи сірого чавуну у виливках кілець-заготовок поришневих кілець. Вплив марганцю, сірки та фосфору в умовах проведеного експерименту вторинний.

Ключові слова: поришні кільця, чавун, гази, кристалізація, перліт, бейніт, мартенсит.

Поршневі кільця – одні з найважливіших деталей двигунів внутрішнього згоряння [1-4]. Передчасний вихід їх з експлуатації, особливо в екстремальній ситуації, матиме не тільки негативні економічні наслідки, але може стати причиною аварії. Поршневі кільця, як жоден інший елемент двигуна, не розглядають так критично, як у разі втрати потужності та збільшення витрат мастила під час його роботи [4]. Тому поршневі кільця є виробами відповідального призначення. Відповідно такими є і матеріали для виготовлення поршневих кілець, а підвищення їхньої якості та вдосконалення технології виробництва – науково-технічні завдання, що не втрачають актуальності.

Сірий чавун з різною структурою графіту та металевої основи залишається основним матеріалом для виготовлення поршневих кілець різного призначення [1, 4-6], структура і властивості яких за інших рівних умов вельми чутливі до якості шихтових матеріалів, що застосовуються для їх лиття. Доменний чавун – основний компонент шихти для виробництва виливків поршневих кілець із сірого чавуну, що містить його базові хімічні елементи: залізо, вуглець, кремній, марганець, фосфор і сірку. Забезпечуючи необхідний хімічний склад доменного чавуну за цими елементами, особливості його виробництва на різних металургійних підприємствах – сировина, що використовується, та ведення доменної плавки [7-9] – закладають спадкові передумови до формування у виливках структури, властивої доменному чавуну, який переплавляється, за інших рівних умов подальшого його застосування.

У проблемі структурної спадковості [10, 11], зокрема й доменних чавунів [7-9], гази чинять великий, але дотепер не з'ясований вплив на механізм утворення структури залізовуглецевих сплавів під час кристалізації та у твердому стані. При цьому про вплив газів на структуру графіту в чавуні відомо давно [7, 8, 12]. У роботі [13] підтверджено вплив умов ведення плавки на газонасиченість сірих чавунів, зменшення вмісту кисню в яких сприяє сфероїдизації графіту, що необхідно для забезпечення високих механічних властивостей поршневих кілець [14] та інших виливків. Водночас на властивості виливків із сірого чавуну впливає і структура його металевої основи [6, 7], вимоги до якої для поршневих кілець визначаються формою графіту [5].

Для широко застосовуваних у двигунобудуванні поршневих кільцях зі спеціального сірого чавуну з пластинчастою формою графіту структура металевої основи повинна складатися з дисперсного перліту і допустимого не більше 5 % доєвтектоїдного фериту [5]. Виробництво таких поршневих кілець здійснюють з виливків кілець-заготовок, які отримують методом індивідуального лиття у вертикально-стопкові форми [2, 15]. У цьому випадку необхідна структура металевої основи поршневих кілець із сірого чавуну має формуватися в умовах швидкого охолодження виливків кілець-заготовок, площа перерізу яких усього кілька десятків квадратних міліметрів безпосередньо в литому стані без застосування спеціальної термічної обробки. Сказане обумовлює технологічну складність масового стабільного виробництва поршневих кілець із сірого чавуну з необхідною структурою

не тільки пластинчастого графіту, а й металевої основи. Найважливішою умовою досягнення цього є застосування високоякісних шихтових матеріалів з використанням доменних чавунів, хімічний склад яких (шихти), включно з газами, за заданих методів та умов ведення плавки, а також способів обробки розплаву має забезпечити необхідну стійкість аустеніту до переохолодження для формування структури дисперсного перліту в сірому чавуні.

Метою роботи було вивчити вплив газів O, N і H на структуру металевої основи виливків кілець-заготовок поршневих кілець із сірого чавуну, виготовлених із шихти на основі доменного чавуну.

Для проведення досліджень були відлиті кільця-заготовки діаметром 110 і 130 мм із сірого чавуну, призначені для виготовлення компресійних поршневих кілець автотракторної техніки. Зовнішній вигляд отриманих виливків після вибиття з ливарної форми подібний до виливків, наведених у роботі [2] (рис. 1 а).

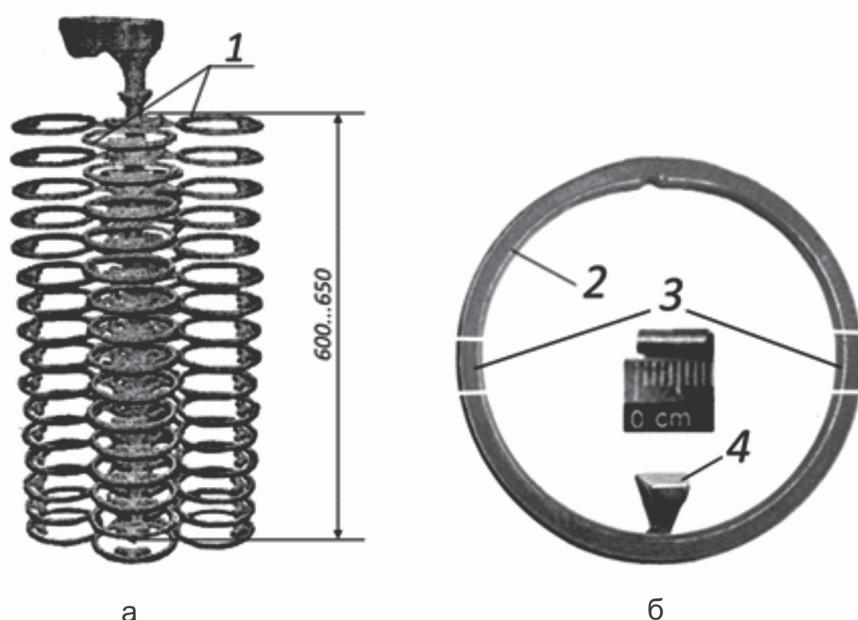


Рис. 1. Виливки кілець-заготовок поршневих кілець: 1 – виливки після вибиття з ливарної форми [2]; 2 – виливок із зовнішнім діам. 130 мм; 3 – циліндричні зразки для газового аналізу та місця їх відбору; 4 – випор.

Fig. 1. Castings of piston ring blanks: 1 – castings after removal from the casting mould [2]; 2 – casting with an outer diameter of 130 mm; 3 – cylindrical samples for gas analysis and their sampling locations; 4 – ejector.

Основними компонентами шихти були доменні чавуни заводу «А» марки Л4 і заводу «Б» марки ЛЗ («А» і «Б» – умовні позначення металургійних підприємств). Регламентований хімічний склад доменних чавунів марок Л4 і ЛЗ наведено в табл. 1. Для варіювання хімічного складу чавунних виливків кілець-заготовок у межах вимог ПрАТ «Одеський завод поршневих кілець» щодо вмісту вуглецю та легуючих елементів у шихту вводили електродний бій і необхідні феросплави.

Таблиця 1
Хімічний склад доменного чавуну за ГОСТ 4832-95

Table 1
Chemical composition of blast furnace iron according to GOST 4832-95

Марка чавуну	Вміст хімічних елементів, % мас.				
	C	Si	Mn	P	S
ЛЗ	3,4-4,5	2,4-2,8	0,6-0,8	0,4-0,6	≤0,04
Л4		2,0-2,4			

Плавки здійснювали у 250-кг індукційній печі ІЧТ-250. Температура перегріву і температура розливання відповідно становили 1530-1560 і 1395-1520 °С. Хімічний склад дослідних плавок, діаметри виливків і склад вихідних шихтових матеріалів наведено в табл. 2. Хімічний склад плавок визначено за допомогою спектрометра GDS-500 компанії «LECO» на спеціально вибілених пробах для зв'язування вуглецю в цементит. Газовий аналіз виконано за ДСТУ 8920:19 «Сталі та сплави. Методи визначення газів» за допомогою газоаналізаторів ELTRA-ON 900 та ELTRA-OH 900. Зразки відбирали від бічних ділянок виливків (рис. 1 б), які найбільш інтенсивно охолоджуються під час кристалізації та у твердому стані. Площа

Таблиця 2
Хімічний склад виливків кілець-заготовок поршневих кілець із сірого чавуну

Table 2
Chemical composition of grey cast iron piston ring blanks

№	Вміст хімічних елементів, % мас.								
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
1	3,94	0,47	2,45	0,24	0,024	0,22	0,330	0,400	0,160
2	3,94	0,47	2,45	0,24	0,024	0,22	0,330	0,400	0,160
3	3,44	0,42	2,65	0,33	0,021	0,12	0,130	0,150	0,130
4	3,30	0,55	2,73	0,33	0,040	0,21	0,098	0,086	0,074
5	3,64	0,46	2,40	0,28	0,040	0,23	0,130	0,370	0,090
6	3,58	0,59	2,50	0,55	0,040	0,26	0,240	0,500	0,270
Примітка:									
1 – діам. 110 мм, шихта: 100 % доменний чавун «А» марки Л4;									
2 – діам. 130 мм, шихта: 100 % доменний чавун «А» марки Л4;									
3 – діам. 130 мм, шихта: 100 % доменний чавун «А» марки Л4;									
4 – діам. 130 мм, шихта: 100 % доменний чавун «Б» марки ЛЗ;									
5 – діам. 110 мм, шихта: 60 % доменний чавун «А» марки Л4 + 15 % доменний чавун «Б» марки ЛЗ + 20 % оборот власного виробництва + 5 % феросплави;									
6 – діам. 110 мм, шихта: 48 % доменний чавун «А» марки Л4 + 32 % доменний чавун «Б» марки ЛЗ + 20 % обороту власного виробництва + до 1 % легуючих для компенсації угару.									

перерізу в цих місцях виливків діам. 110 і 130 мм відповідно 29 і 39 мм². Аналізували три зразки від одного виливка зі стопи кожної плавки. У разі великого розкиду одержуваних результатів аналіз повторювали. Структуру виливків у місцях відбору зразків для газового аналізу досліджували за допомогою металографічного мікроскопа «Axiovert 200M MAT». У цих же місцях визначали твердість чавуну методом Роквелла за шкалою В.

Результати аналізу газів у виливках дослідних плавок наведено на рис. 2.

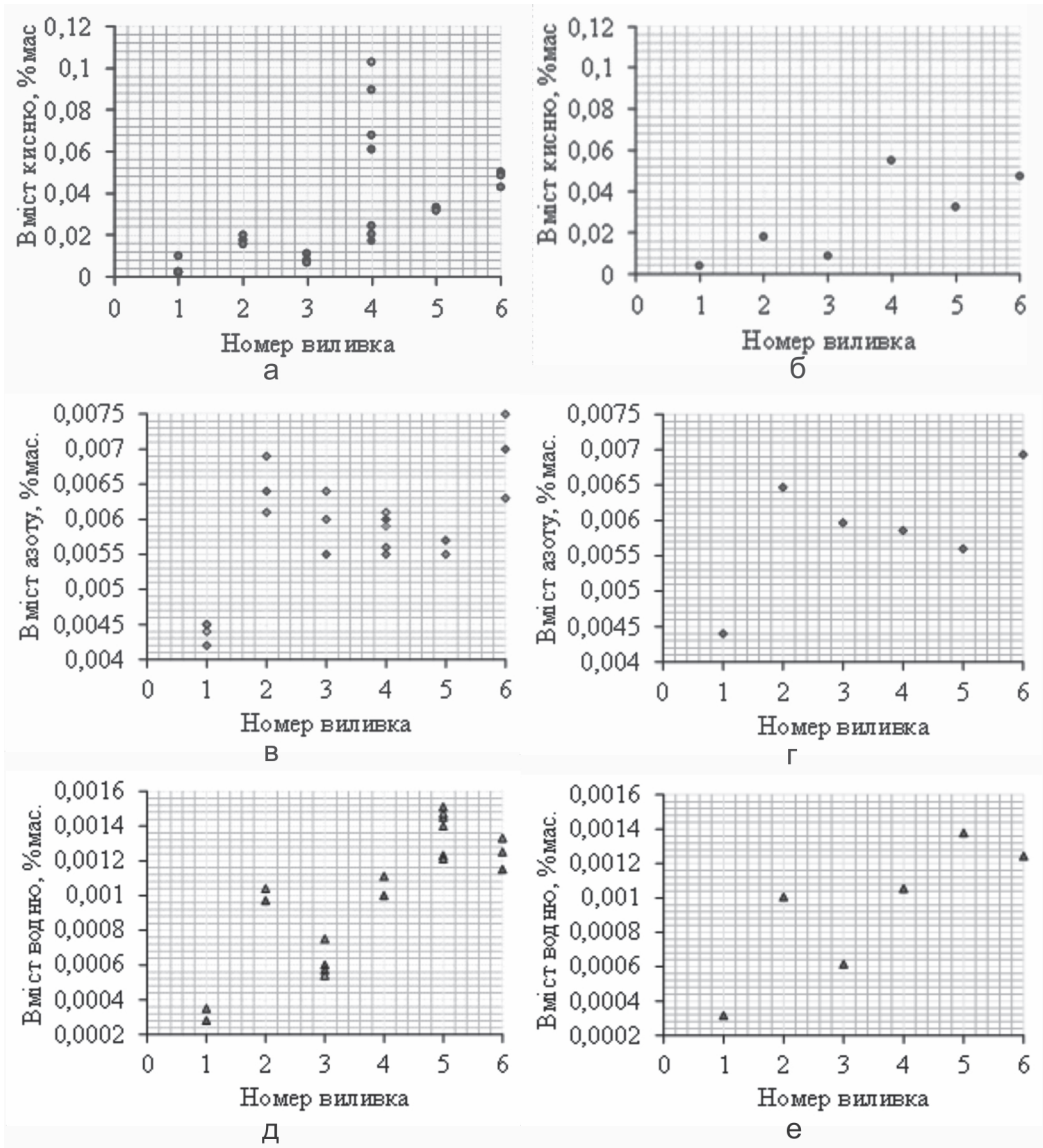


Рис. 2. Вміст О (а, б), N (в, г) і Н (д, е) у виливках кілець-заготовок поршневих кілець із сірого чавуну: а, в, д – у кожному зразку; б, г, е – середнє значення за зразками.

Fig. 2. Content of O (a, б), N (в, г), and H (д, е) in castings of grey cast iron piston ring blanks: а, в, д – in each sample; б, г, е – average values across samples.

Чавун

Привертає увагу значний розкид вмісту кисню в зразку плавки №4 з доменного чавуну ЛЗ підприємства «Б». Нижче буде показано, що додавання цього чавуну у великій кількості до шихти плавки №6 призвело до формування в зразку цієї плавки структури металевої основи чавуну близької до структури зразка плавки №4. Пов'язано це, найімовірніше, більшою мірою з впливом кисню, ніж азоту і водню на утворення структури металевої основи сірого чавуну. Розглянемо отримані результати більш детально.

Зіставлення середніх значень вмісту газів у зразках дослідних плавок (рис. 2 б, г, е) з їхніми мікроструктурами (рис. 3) показало наступне. Найменша кількість О, N і Н у зразку плавки №1 призвела до його часткового вибілювання з утворенням структури пластинчастого ледебуриту, а також графіто-аустенітних колоній, у яких аустеніт перетворився на перліт та ферит (рис. 3 а). Графіт має вермикулярну форму і межендритний розподіл на відміну від графіту інших плавок, у яких утворюється пластинчастий графіт гніздоподібної форми з розетковим розподілом. Середні значення вмісту газів у зразку плавки №1 відповідно становили: 0,0038 % О, 0,0044 % N і 0,00032 % Н. Збільшення вмісту газів у зразках виливків інших плавок усуває вибіл. Однак за середніх величин 0,0177 % О, 0,0065 % Ni 0,00101 % Н у зразку плавки №2 по межах евтектичних колоній спостерігається вміст 10-15 % бейніто-мартенситної структури (рис. 3 б), що є неприпустимим для поршневих кілець із чавуну з пластинчастим графітом. Зростання кількості газів, особливо кисню (рис. 2 а, б) у зразках плавки №4 і №6, зумовлене використанням у шихті великої кількості доменного чавуну ЛЗ підприємства «Б», значно стабілізує аустеніт. У цих зразках практично вся структура металевої основи чавуну бейніто-мартенситна (рис. 3 г, е), що підвищує твердість зразків до рівня твердості зразка плавки №1 (табл. 3).

Таблиця 3

Структура й твердість виливків кілець-заготовок поршневих кілець з сірого чавуну

Table 3

Structure and hardness of grey cast iron piston ring blanks

Номер / діаметр виливки (мм)														
1 / 110		2 / 130			3 / 130		4 / 130			5 / 110		6 / 110		
Структура високовуглецевої фази														
ледебурит, графіт		графіт			графіт		графіт			графіт		графіт		
Структура металевої основи *, %														
П	Ф	П	Б	М	П	Ф	Т	Б	М	П	Ф	Т	Б	М
93-97	3-7	85-90	10-15		93-97	3-7	3-5	95-97		>99	<1	1-2	98-99	
Твердість, HRB														
107		101			95		103			96		108		
Примітка:														
*П – перліт; Т – троостит; Ф – феррит; Б – бейніт; М – мартенсит														

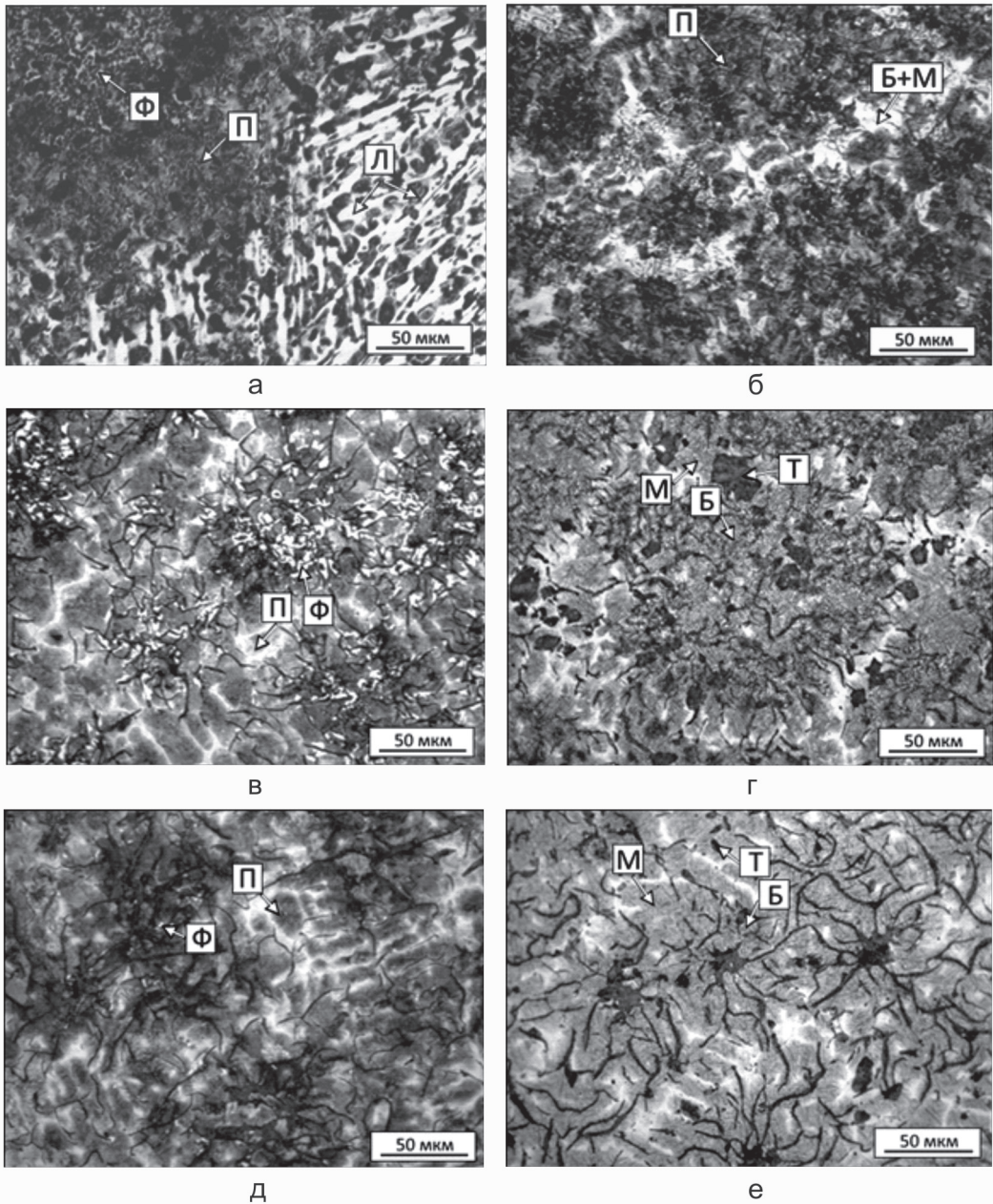


Рис. 3. Мікроструктура виливків кілець-заготовок поршневих кілець із сірого чавуну: №1 (а), №2 (б), №3 (в), №4 (г), №5 (д), №6 (е); Л – ледебурит; П – перліт; Т – троостит; Ф – феррит; Б – бейніт; М – мартенсит.

Fig. 3. Microstructure of grey cast iron piston ring blanks: No. 1 (a), No. 2 (б), No. 3 (в), No. 4 (г), No. 5 (д), No. 6 (е); Л – ledeburite; П – pearlite; Т – troostite; Ф – ferrite; Б – bainite; М – martensite.

Привертає увагу те, що утворення перлітної структури в зразках плавки №3 (рис. 3 в) і №5 (рис. 3 д) відбувається за суттєвої різниці середнього вмісту в них кисню, що відповідно дорівнює 0,0085 і 0,0324 %.

Цікаво й те, що в зразку плавки №2, в якому найменша кількість гартивних структур, кисню менше, ніж у зразку плавки №5, в якому вони не

спостерігаються. Ймовірно, для умов охолодження, що виникли, стабілізація аустеніту в зразку плавки №5 під дією газів, насамперед кисню, була меншою, ніж у зразку плавки №2 через менший вміст азоту, який також стабілізує аустеніт. Водночас у зразку плавки №5 більше водню, який підвищує стійкість переохолодженого аустеніту, сприяючи диспергуванню перліту й утворенню мартенситу [16]. Можна припустити, що утворення гартівних структур під дією кисню та водню в зразку плавки №5 не було реалізовано через знижений вміст азоту, тоді як його більша кількість у зразку плавки №3, що могла б сприяти утворенню гартівних структур, ймовірно, була нівельована низьким вмістом водню.

Отримані результати показують, що O, N і H чинять складний комплексний вплив на стійкість аустеніту до розпаду під час переохолодження, але діють вони всі однаково – у бік його стабілізації. Найімовірніше, на структуру металевої основи сірого чавуну досліджених зразків кисень чинить найбільший вплив, ніж азот і водень, які різною мірою посилюють цей ефект.

Справедливо постає питання щодо впливу на структуру металевої основи сірого чавуну досліджених зразків інших чинників, таких як їх хімічний склад та швидкості охолодження, що залежить від площі поперечного перерізу, яка визначається діаметром виливків кілець-заготовок і місцем відбору зразків. Необхідно також враховувати вплив хімічної мікронеоднорідності аустеніту сірого чавуну, пов'язаної зі структурою пластинчастого графіту [17]. Так, наприклад, вибіл у зразку плавки №1, відібраному від бічної частини кільця-заготовки, був відсутній у ділянці кріплення цього виливка до стояка ливникової системи, де швидкість охолодження є мінімальною, а в діаметрально протилежному до цього місця – в ділянці випору (рис. 1 б) – вибіл спостерігався знову. Однак вибіл не був виявлений в інших зразках виливків кілець-заготовок, в яких газонасиченість була більшою, ніж у зразку №1. У зразках діам. 130 і 110 мм плавки №4 і №6 з площею поперечного перерізу відповідно 39 і 29 мм², що обумовлює різну швидкість охолодження утворюється близька бейніто-мартенситна структура металевої основи сірого чавуну.

Для визначення значущості впливу технологічних факторів (діаметру виливків та їх хімічного складу) на утворення бейніто-мартенситної структури металевої основи сірого чавуну було проведено комплексний кореляційний аналіз. Встановлення множинних кореляційних зв'язків та числових значень коефіцієнтів кореляції було отримано за допомогою застосування опції «Аналіз даних» програмного продукту «Microsoft Excel». Отримані дані наведено на рис. 4.

Аналіз даних рис. 4 показує, що різниця у швидкості охолодження, яка обумовлена різною площею поперечного перерізу виливків діам. 110 і 130 мм має зворотний і малозначущий зв'язок з утворенням бейніто-мартенситної структури. Тобто незважаючи на те, що зі зменшенням перерізу і, відповідно, зростанням швидкості охолодження виливків діам. 130 і 110 мм кількість бейніту і мартенситу в їх структурі практично не змінюється. Однак

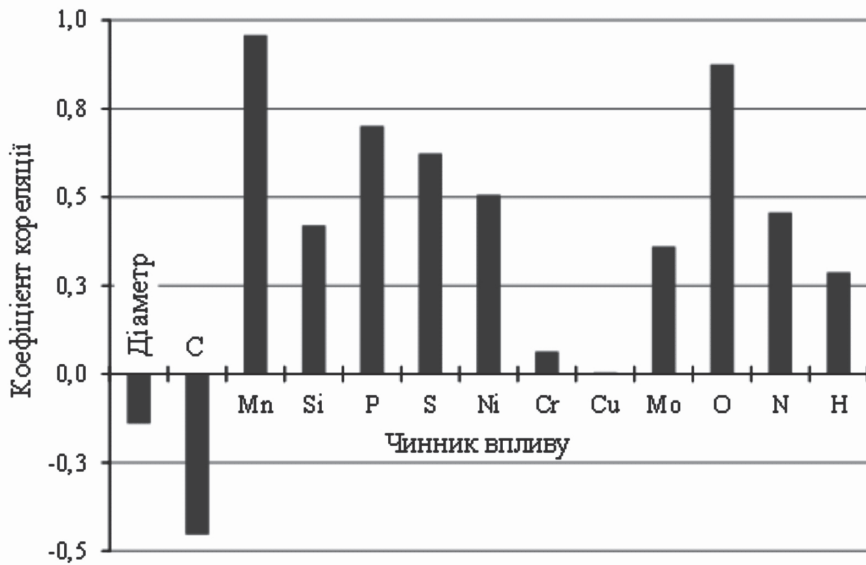


Рис. 4. Результати множинного кореляційного аналізу впливу діаметра та хімічного складу виливків кілець-заготовок поршневих кілець із сірого чавуну на утворення бейніто-мартенситної структури.

Fig. 4. Results of multiple correlation analysis of the influence of diameter and chemical composition of castings of piston ring blanks made of gray cast iron on the formation of bainite-martensite structure.

цей висновок має очевидне обмеження. Зокрема для виливків компресійних поршневих кілець діам. 72 мм з площею поперечного перерізу 18 мм² різниця у швидкості охолодження порівняно з досліджуваними виливками буде значною і повинна сприяти утворенню гартівних структур.

Цікавий вплив вуглецю, який аналогічно діаметру виливків має зворотний, але помірний зв'язок з утворенням бейніто-мартенситної структури. Вуглець, як відомо, у загальному випадку стабілізує аустеніт та зменшує критичну швидкість охолодження сталі. Тому вплив вуглецю мав би характеризуватися прямим зв'язком із утворенням гартівних структур в металевій основі чавуну. Однак відомо, що для заевтектоїдних сталей у разі їх загартування із двофазної аустеніто-цементитної області критична швидкість охолодження зростає [18]. Пов'язано це із наявністю високовуглецевої фази – цементиту, який є місцем зародження перліту, що зменшує стійкість аустеніту до переохолодження. Ймовірно, такий самий ефект спостерігається і щодо досліджених сірих чавунів, у яких високовуглецевою фазою є пластинчастий графіт.

Інші хімічні елементи, включаючи гази, мають пряму дію на утворення бейніто-мартенситної структури. Особливо сильно впливає марганець та кисень, незважаючи на їх антагонізм у фізико-хімічних процесах виробництва чавуну та сталі. Однак наявні концентрації марганцю менше відомих допустимих значень (0,6-1,0 %) для поршневих кілець [19]. Тому подальше зменшення вмісту марганцю є неприпустимим і може призвести до утворення великої кількості фериту та низької твердості чавуну. З цього можна зробити висновок, що основним елементом, що

впливає на утворення гартівних структур в досліджених зразках та потребує обов'язкового коригування є кисень. Азот і водень впливають меншою мірою. Кремній надає помірний вплив на схильність чавуну до загартування. Зміна його концентрації при такому відносно малому впливі недоцільна, тому що кремній другий після вуглецю графітоутворюючий елемент у чавуні. Тому зменшення його концентрації призведе до небажаної зміни структури графіту. Для запобігання загартування чавуну необхідне зниження вмісту сірки, кількість якої, однак, і так менша за допустимі значення (0,10-0,15 %) [19]. Зменшення вмісту фосфору з цією ж метою може негативно позначитися на рідкоплинності розплаву чавуну та втрату твердості виливків. Доцільно, в тому числі і з економічної точки зору, зниження вмісту нікелю та молібдену, але за умови забезпечення необхідної твердості виливків. Хром та мідь у досліджуваному діапазоні концентрацій практично не впливають на утворення гартівних структур.

Таким чином, підвищений вміст газів, особливо кисню, що надходять з шихтових матеріалів, в першу чергу з доменного чавуну, у разі відсутності рафінування розплаву за інших рівних умов ведення плавки є основною причиною утворення гартівної бейніто-мартенситної структури металевої основи сірого чавуну в виливках кілець-заготовок. Вплив марганцю, сірки та фосфору в умовах проведеного експерименту вторинний, тому що їх кількість не перевищує допустимі та необхідні значення. Комплексне видалення сірки та газів досягається різними методами обробки розплаву, сприятливо впливаючи на структуру графіту та металевої матриці чавуну.

Автори вдячні директору ТОВ «МЗ «ДНІПРОСТАЛЬ» Бібіку А.С. та спеціалістам випробувальної лабораторії Сливній О.А. та Смик Л.В. за надану допомогу у проведенні досліджень.

Література

1. Энглиш К. Поршневые кольца: Пер. с нем. / под ред. В. К. Житомерского. Т. 1. Теория, изготовление, конструкция и расчет. – М.: Машгиз, 1962. – 583 с.
2. Мельников А. П., Голуб Д. М., Фонов В. В., Болотский В. Д. Высокотехнологичное оборудование для изготовления вертикально-стопочных форм в производстве отливок поршневых колец // Литье и металлургия. – 2006. – № 2 (38). – С. 51-54.
3. Мельников А. П., Садоха М. А., Фонов В. В., Гречаник С. Н. Совершенствование технологии и оборудования для производства заготовок поршневых колец в вертикальных стопочных формах // Литье и металлургия. – 2011. – № 4 (63). – С. 18-22.
4. Поршневые кольца для двигателей внутреннего сгорания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://mam.ms-motorservice.com/mc/eraper?guid=14c0e687ec52f52c> (дата обращения: 19.09.2025).
5. ГОСТ 621. Кольца поршневые двигателей внутреннего сгорания. Общие технические условия. – 32 с.

6. Иванов В. Г. Дослідження структури поршневих кілець з високоміцного чавуну після експлуатації у двотактному двигуні // Вісник двигунобудування. – 2017. – № 1. – С. 156-160.
7. Пивоварский Е. Высококачественный чугу́н. Т. 1. – М.: Металлургия, 1965. – 650 с.
8. Леви Л. И. Влияние условий плавки на содержание газов в чугуне и его «наследственные» свойства // Газы в литом металле. – М.: Наука, 1964. – С. 113-121.
9. Воронова Н. А., Могилевцев О. А., Штейн Н. А. Качество доменного литейного чугуна и пути его повышения. – К.: УкрНИИИНТИ, 1972. – 53 с.
10. Кондратюк С. Є., Пархомчук Ж. В., Стоянова О. М., Щеглов В. М. Спадкове модифікування сталі. – К.: Видавець Кравченко Я. О., 2018. – 130 с.
11. Борисенко А. Ю. О структурной наследственности в серых чугунах // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. науч. тр. – 2009. – Вып. 20. – С. 254-265.
12. Гиршович Н. Г. Чугунное литье. – Л., М.: Металлургиздат, 1949. – 708 с.
13. Иванов В. Г. Вплив умов плавки та газонасиченості на формоутворення графіту в чавунах // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2018. – № 1. – С. 16-20.
14. Иванов В. Г. Розподіл хімічних елементів у структурі високоміцного чавуну для маслотної заготовки поршневих кілець // Вісник двигунобудування. – 2016. – № 1. – С. 121-127.
15. Крутилин А. Н., Станюк А. И., Станюк Д. И. Анализ существующих способов получения заготовок поршневых колец // Литье и металлургия. – 2005. – № 3 (35). – С. 33-36.
16. Шаповалов В. И. Легирование водородом. – Д.: Журфонд, 2013. – 385 с.
17. Борисенко А. Ю., Балаханова Т. В. Зв'язок хімічної мікронеоднорідності сірого чавуну та структури пластинчатого графіту // Металознавство та обробка металів. – 2024. – № 4. – С. 36-46.
18. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. – М.: Металлургия, 1978. – 392 с.
19. Гиршович Н. Г. Справочник по чугу́нному литью. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.

References

1. English, K. (1962). *Porshnevyye kol'tsa* [Piston rings] (Vol. 1, Theory, manufacturing, design and calculation; V. K. Zhitomersky, Ed.; Trans. from German). Mashgiz. [in Russian]
2. Mel'nikov, A. P., Golub, D. M., Fonov, V. V., & Bolotskiy, V. D. (2006). High-tech equipment for manufacturing vertical-stack molds in the production of piston ring castings. *Lit'e i metallurgiya*, (2 [38]), 51-54. [in Russian]
3. Mel'nikov, A. P., Sadoha, M. A., Fonov, V. V., & Grechanik, S. N. (2011). Improvement of technology and equipment for producing piston ring blanks in vertical stack molds. *Lit'e i metallurgiya*, (4[63]), 18-22. [in Russian]
4. Motorservice. (2025). *Porshnevyye kol'tsa dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Piston rings for internal combustion engines]. <https://mam.ms-motorservice.com/mc/epaper?guid=14c0e687ec52f52c> [in Russian]

5. GOST 621. (n.d.). *Kol'tsa porshnevye dvigateley vnutrennego sgoraniya. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [Piston rings of internal combustion engines. General specifications]. [in Russian]
6. Ivanov, V. H. (2017). Doslidzhennia struktury porshnevnykh kil'ts' z vysokomitsnoho chavunu pislia ekspluatatsii u dvotaktnomu dvyhuni [Investigation of the structure of piston rings made of high-strength cast iron after operation in a two-stroke engine]. *Visnyk dvyhunobuduvannia*, (1), 156-160. [in Ukrainian]
7. Pivovarsky, E. (1965). *Vysokokachestvennyy chugun* [High-quality cast iron] (Vol. 1). Metallurgiya. [in Russian]
8. Levi, L. I. (1964). Vliyanie usloviy plavki na sodержanie gazov v chugune i ego «nasledstvennye» svoystva [Effect of melting conditions on gas content in cast iron and its “inherited” properties]. In *Gazy v litom metalle* (pp. 113-121). Nauka. [in Russian]
9. Voronova, N. A., Mogilevtsev, O. A., & Shteyn, N. A. (1972). *Kachestvo domennogo liteynogo chuguna i puti ego povysheniya* [Quality of blast furnace foundry cast iron and ways of its improvement]. UkrNIINTI. [in Russian]
10. Kondratiuk, S. Ye., Parkhomchuk, Zh. V., Stoianova, O. M., & Shcheglov, V. M. (2018). *Spadkove modyfikuvannia stali* [Hereditary modification of steel]. Vydavets Kravchenko Ya. O. [in Ukrainian]
11. Borisenko, A. Yu. (2009). O strukturnoy nasledstvennosti v serykh chugunakh [On structural heredity in gray cast irons]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii*, (20), 254-265. [in Russian]
12. Girshovich, N. G. (1949). *Chugunnoe lit'e* [Cast iron casting]. Metallurgizdat. [in Russian]
13. Ivanov, V. H. (2018). Vplyv umov plavky ta hazonasychenosti na formoutvorennia hrafitu v chavunakh [Effect of melting conditions and gas saturation on graphite formation in cast irons]. *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, (1), 16-20. [in Ukrainian]
<https://doi.org/10.15588/1607-6885-2018-1-2>
14. Ivanov, V. H. (2016). Rozpodil khimichnykh elementiv u strukturi vysokomitsnoho chavunu dlia maslotnykh zahotivok porshnevnykh kil'ts' [Distribution of chemical elements in the structure of high-strength cast iron for oil ring blanks]. *Visnyk dvyhunobuduvannia*, (1), 121-127. [in Ukrainian]
15. Krutinin, A. N., Stanyuk, A. I., & Stanyuk, D. I. (2005). Analiz sushchestvuyushchikh sposobov polucheniya zagotovok porshnevnykh kol'ts [Analysis of existing methods of obtaining piston ring blanks]. *Lit'e i metallurgiya*, (3 [35]), 33-36. [in Russian]
16. Shapovalov, V. I. (2013). *Legirovanie vodorodom* [Alloying with hydrogen]. Zhurfond. [in Russian]
17. Borisenko, A. Yu., & Balakhanova, T. V. (2024). Zv'язok khimichnoi mikroneodnorodnosti siroho chavunu ta struktury plastynchatoho hrafitu [Relation between chemical micro-inhomogeneity of gray cast iron and the structure of flake graphite]. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (4), 36-46. [in Ukrainian] <https://doi.org/10.15407/mom2024.04.003>
18. Novikov, I. I. (1978). *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov* [Theory of heat treatment of metals]. Metallurgiya. [in Russian]
19. Girshovich, N. G. (1978). *Spravochnik po chugunnom lit'yu* [Handbook on cast iron casting]. Mashinostroenie. [in Russian]

The influence of O, N and H on the structure of the metal base of gray cast iron in castings of piston ring blanks

A. Yu. Borysenko, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher,
asbor75@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2120-0944>

L. S. Molchanov, Candidate of Technical Sciences, Head of Department,
metall729321@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6139-5956>

T. S. Golub, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Senior Researcher,
isinasu.golubts@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9269-2953>

Iron and Steel institute of Z. I. Nekrasov of NAS of Ukraine, Dni pro, Ukraine

Summary

The influence of oxygen, nitrogen and hydrogen on the structure of the metal base of castings of piston ring blanks with a diameter of 110 and 130 mm from gray iron, made from a charge based on blast furnace iron from different enterprises, was studied. A comprehensive correlation analysis of the significance of the influence of the diameter of castings of ring blanks and their chemical composition on the formation of the bainite-martensitic structure of the metal base of gray iron was carried out. Oxygen, nitrogen and hydrogen have a complex effect on the resistance of austenite to decomposition during supercooling, but they act in the same way - towards its stabilization, contributing to the hardening of gray iron. The minimum total amount of oxygen, nitrogen and hydrogen leads to partial bleaching of studied castings. Oxygen has a greater effect on the structure of the metal base of gray cast iron in investigated castings than nitrogen and hydrogen, which enhance this effect to varying degrees. The difference in the cooling rate has practically no effect on the formation of a quenching bainite-martensitic structure. Carbon does not have a significant effect on the tendency of cast iron to quench. Among the alloying and impurity elements, the greatest influence on the formation of the bainite-martensitic structure is exerted by manganese, sulfur, phosphorus and nickel. The increased content of gases, especially oxygen, coming from the charge materials, primarily from blast furnace iron, in the absence of melt refining under other equal conditions of smelting is the main reason for the formation of the quenching bainite-martensitic structure of the metal base of gray cast iron in the castings of piston ring blanks. The influence of manganese, sulfur and phosphorus under the conditions of the experiment is secondary.

Keywords: piston rings, cast iron, gases, crystallization, pearlite, bainite, martensite.