

УДК 621.787.669:15.196

**М.В. Дмитріюк, Д.А. Гусачук, І.О. Парфентьева***Луцький національний технічний університет***ЕВОЛЮЦІЯ СТРУКТУРИ ШАРІВ ТЕРТЯ ПРИ ЗНОШУВАННІ МІДИСТОГО ЧАВУНУ**

*Розглянуто особливості формування параметрів субструктури по глибині приповерхневого шару після виробовування на стійкість проти спрацювання. Показано можливість утворення дисипативних структур при поєднанні легування та ізотермічного гартування.*

*Встановлено формування в мідистих чавунах (>6,2 % мас., Cu) нової трибофазы на основі міді  $\epsilon$ -фазы. Досліджено структурні особливості бейнітних мідистих високоміцних чавунів, отриманих за різних температур ізотермічного гартування (350 °C, 400 °C, 450 °C). Найбільш високі параметри зносостійкості спостерігаються після обробки за температури ізотермічного гартування 350 °C. Встановлено, що висока зносостійкість структури нижнього бейніту пов'язується з спільним впливом трибофаз (Gr.+ $\epsilon$ -фазы) і легованого міддю аустеніту*

*Ключові слова:* мідистий чавун, дисипація, зношування, ізотермічне гартування, субструктура

**Н.В. Дмитріюк, Д.А. Гусачук, І.А. Парфентьева****ЕВОЛЮЦІЯ СТРУКТУРИ СЛОїв ТРЕННЯ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ МЕДИСТОГО ЧУГУНА**

*Рассмотрены особенности формирования параметров субструктуры по глубине приповерхностного слоя после испытания на стойкость против износа. Показана возможность образования диссипативных структур при сочетании легирования и изотермической закалки.*

*Установлено формирование в медистых чугунах (>6,2 % мас., Cu) новой трибофазы на основе меди  $\epsilon$ -фазы. Исследованы структурные особенности бейнитных медистых высокопрочных чугунов, полученных при разных температурах изотермической закалки (350 °C, 400 °C, 450 °C). Наиболее высокие параметры износостойкости наблюдаются после обработки при температуре изотермической закалки 350 °C. Установлено, что высокая износостойкость структуры нижнего бейнита связана с влиянием трибофаз (Gr.+ $\epsilon$ -фазы) и легированного медью аустенита.*

*Ключевые слова:* медистый чугун, диссипация, износ, изотермическая закалка, субструктура

**N. Dmytryuk, D. Husachuk, I. Parfentyeva****EVOLUTION OF THE STRUCTURE OF THE FRICTION LAYERS IN THE WEAR OF COPPER CAST IRON**

*Research is dedicated to the development of technological principles of formation processes management of heterogeneous structure of new highly-efficient materials based on bainitic class cupreous ductile irons and determination of microstructure correlation interconnections – properties, on which basis, the optimization of antifriction materials composition is performed, that systemically allows to solve the questions of increasing work efficiency of the friction pairs. The fact of formation of copper based epsilon-phase new wear-resistant phase in cupreous cast irons (>6.2 % mass, Cu) is observed. Structural features of bainitic cupreous ductile irons obtained at different austempering temperatures (350°C, 400°C, and 450°C) have been studied, the highest wear-resistance parameters after processing at 350°C isothermal tempering have been observed. High wear resistance of lower bainite structure connected with the common influence of wear-resistant phases (graphite+ epsilon-bronze) and copper doped austenite is determined.*

*Keywords:* copper cast iron, dissipation, wear, isothermal hardening, substructure

**Постановка проблеми.** За останнє десятиріччя у світовій практиці значно розширилося виробництво та застосування бейнітних високоміцних чавунів, які відрізняються від інших класів чавунів значним зростанням як міцності, так і в'язкості та зносостійкості. Саме тому аустенітно-бейнітний чавун широко використовується для виготовлення зубчатих передач, зубчатих коліс, що працюють в умовах високих навантажень, тримачів пружин для вантажних автомобілів, з'єднувальних рам і т.д., з успіхом замінюючи вуглецеві, низьколеговані сталі та бронзи. Проте, застосування такого чавуну в парах тертя ковзання (підшипниках) має певні застереження. В таких виробках можна передбачити перспективу застосування сірих чавунів, структура яких містить мідь в кількостях, не менших за межу її розчинності в твердих розчинах цих сплавів. Для більш широкого застосування у промисловості такого класу чавунів необхідно розробити якісно нові підходи до досліджень закономірностей, що визначають природу процесів формування властивостей у виливках із білих і сірих чавунів на основі систем Fe–Cu–C.

Різноманітні функціональні можливості, якими відзначаються ці сплави, а також простота і доступність виготовлення з них виливок, дозволяють успішно вирішувати комплекс задач з проблем підвищення надійності і довговічності обладнання, яке використовується в складних умовах експлуатації.

Реалізація інтенсивних технологій отримання мідистих сірих чавунів суттєво змінює природу сплавів і, головним чином, за рахунок утворення в литій структурі нової трибофази на основі міді ( $\epsilon$ -фази). Гетерогенна структура мідистих сірих чавунів, за своєю суттю, є конгломератом, що складається із трибо фаз: графіт  $\Gamma$ ,  $\epsilon$ -фаза і металевої матриці. Формування у виливках такої структури сприяє якісним змінам фізико-механічних властивостей виливок і, в першу чергу – характеристик зносостійкості.

Незважаючи на очевидний успіх, досягнутий в галузях використання мідистих сірих чавунів, для отримання зносостійких виливок, функціональні особливості, закладені в цю категорію сплавів, залишаються до кінця невикористаними. Так, залишається нез'ясованим вплив високих концентрацій міді на формування в литій структурі виливок сірих чавунів графіту кулястої форми. Великий резерв для подальшого удосконалення цієї категорії сплавів міститься в металевої матриці, кількість якої в гетерогенній структурі складає не менше 70 % мас. Є відомості, що спеціальні види термічної обробки сприяють підвищенню ефективності легуванням міддю. А саме, така можливість закладена в ізотермічному гартуванні чавунів і дозволяє отримати структуру нижнього бейніту із високим вмістом у їх складі  $\gamma$ -фази, здатної розчинити мідь у відносно високих концентраціях. Відомі зносостійкі мідисті чавуни мають переважно перлітну структуру, до складу якої входить  $\alpha$ -фаза. Розчинність міді в такій структурі не більше 0,5...0,8 % мас. Отже, актуальним є вивчення особливостей процесів формування бейнітних структур високомідистих чавунів і встановлення взаємозв'язку їх мікроструктури з фізико-механічними властивостями виливків, в першу чергу, характеристиками зносостійкості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Згідно літературних даних [1-3] зносостійкість спряжених пар у вузлах тертя багато у чому визначається процесами, що протікають як безпосередньо на поверхні контакту, так і в приповерхневому робочому шарі.

Пара тертя з точки зору термодинаміки являє собою відкриту термодинамічну систему, що постійно живиться механічною енергією. В умовах тертя більша частина енергії при зовнішньому механічному впливі трансформується у тепловий ефект [1, 2]. Зазначені вище дані свідчать про те, що вузли тертя слід відносити до дисипативних систем [4, 3].

**Постановка завдань.** Використання міді як легуючого компоненту у Fe-C сплавах поширено у ливарному виробництві для отримання виливок з підвищеними характеристиками. А саме: зносостійкості, антифрикційності чавунів. Тому мета дослідження - оцінка впливу міді на зносостійкість і субструктуру приповерхневого шару після зношування високомідистого чавуну з бейнітною структурою металевої матриці.

**Викладення основного матеріалу.** Предметом дослідження слугують леговані міддю високомідисті чавуни в кількостях від 6 до 9% мас. Cu. Встановлено [1,2], що у чавунах з таким вмістом міді спостерігається підвищення ступеню гетерогенності системи за рахунок утворення додаткової трибофази на основі міді ( $\epsilon$ -бронзи) і якісно змінюється весь комплекс фізико-механічних властивостей.

Такі чавуни належать до категорії складних металевих систем, складність яких полягає не тільки у багаточисельності об'єктів, що їх складають, але і у значній складності видів взаємодії між ними. З позиції нерівноважної термодинаміки і синергетики такі системи при зовнішньому механічному впливі, в тому числі процесів зношування, володіють здатністю до розвитку процесів самоорганізації дисипативних структур.

Встановлено, що найбільш високі характеристики зносостійкості досягаються у чавунах з бейнітною структурою. В експериментах використовувалось ізотермічне гартування, що дозволяє отримати структуру нижнього і верхнього бейніту: температура аустенізації  $860 \pm 5^\circ\text{C}$ , аустемперінга  $350^\circ\text{C}$ ,  $400^\circ\text{C}$ ,  $450^\circ\text{C}$ .

У роботі використовували традиційні методи оптичної металографії (МІМ-10), мікроаналізатор (ІХА-733 "Jeol"). Випробування на зносостійкість проводили за схемою вал-вкладка. Вал контртіло виготовлене із сталі 20Х13. Вкладка – зразок дослідних плавок (10x10x15мм) з вмістом міді 8.53%. Досліди на зносостійкість проводили при тискові в зоні контакту 2.5 МПа, швидкості обертання вала 1 м/с. В процесі дослідження спряжені пари тертя охолоджувались водою.

Комплексним дослідженням магнітних характеристик та твердості зразків мідистого чавуну (6,25% мас., Cu), загартованого у воді, при вибраних ізотермах  $350 - 450^\circ\text{C}$ , встановлено, що процес проміжного перетворення аустеніту розвивається з різною швидкістю у часі. Як видно з наведених термокінетичних кривих (Рис. 1), в початковий період, процес розвивається прискорено, далі гальмується, а кінцевим етапом є його насичення за рахунок розпаду та

стабілізації складу переохолодженого аустеніту. Стабілізована частина аустеніту не чутлива до швидкості охолодження після завершення процесу розпаду (Рис. 1, а). При цьому суттєвих змін у кількості аустеніту та твердості не спостерігається. Визначено, що структура металевої основи складається з двох фаз:  $\alpha$  та  $\gamma$ . При використанні ізотерми 450 °С частина аустеніту при охолодженні перетворюється в перлітні структури, проте, це перетворення частково відновлюється без його повного завершення (Рис. 1, б).

Проаналізувавши графік кінетичної кривої можна зробити висновок, що найбільш важливою ділянкою процесу проміжного перетворення аустеніту є його завершальна частина, пов'язана з ефектом стабілізації залишкового аустеніту без поновлення перетворення.

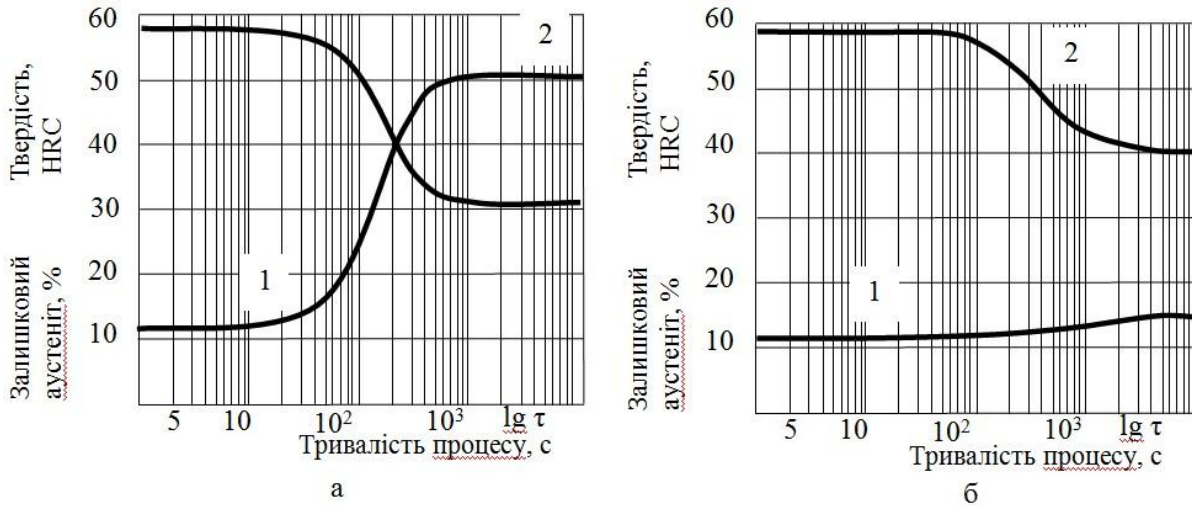


Рис. 1. Взаємозв'язок вмісту залишкового аустеніту (1) та твердості (2) високоміцного чавуну з 6,23 % мас., Si при температурі аустенізації 860 °С+5 °С від тривалості процесу та температури ізотермічного гартування ( $t_{iz}$ ): а)  $t_{iz}=350$  °С, б)  $t_{iz}=450$  °С

Встановлено, що морфологічні особливості аустеніту ( $\gamma$ -фази) в бейніті дослідних чавунів мало залежать від вмісту міді в твердому розчині і визначається, головним чином, температурою ізотермічного гартування (табл. 1).

Таблиця 1.

**Кількість стабілізованого аустеніту залежно від температури ізотермічного гартування**

Температура ізотермічного гартування, °С	Зразки	Вміст міді, % мас.	Характеристика структури		
			Стабілізована кількість $\gamma$ -фази, %	Твердість, HRC <sub>э</sub>	Мікроструктура
350	1,2	6,25	46	32	Бейніт( $\alpha+\gamma$ )
	1,3	7,23	49,6	33	
	1,4	8,53	51,6	34	
450	1,2	6,25	15,4	40	Бейніт( $\alpha+\gamma$ )+мартенсит+троостит
	1,3	7,23	15,2	42	
	1,4	8,53	14,9	42	

Зростання твердості з підвищенням температури ізотермічного гартування свідчить про активізацію розпаду залишкового аустеніту мартенситним шляхом.

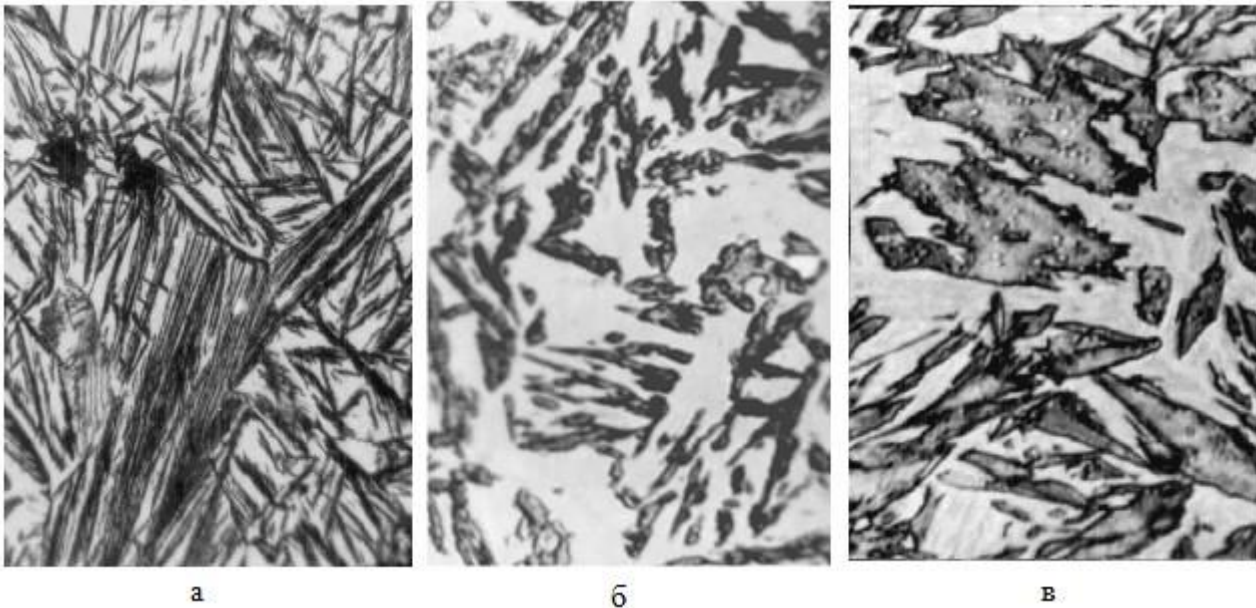
Металографічний аналіз зразків після прийнятої серії температур ізотермічного гартування (350 °С, 400 °С, 450 °С) підтвердив можливість отримання бейнітної структури мідистих високоміцних чавунів (Рис. 2). Тип нижнього і верхнього бейніту вкладається у відомі уявлення про

подібного роду структури ізотермічно загартованих Fe–X–C–сплавів, але відрізняється від останнього деякими особливостями:

- структура верхнього і нижнього бейніту містить включення  $\epsilon$ -фази розміром до 160 мкм. Крім того, наявна мідиста фаза ( $\sim 1$  мкм) у вигляді точкових включень на межі  $\alpha/\gamma$ -фази.

- між фазами міді в бейнітній структурі ізотермічно загартованих зразків у характеристичному мідному випромінюванні на рентгенівському мікроаналізаторі спостерігається яскраво виражена неоднорідність.

Детальне вивчення кривих інтенсивності  $K_{\alpha}$ -випромінювання дозволило визначити, що більша частина міді вміщується в об'ємах, зайнятих  $\gamma$ -фазою, а також в граничних з графітом металевої матриці. Встановлено, що розчинність міді в бейнітній структурі ( $860^{\circ}\text{C} \rightarrow 350^{\circ}\text{C} \rightarrow 20^{\circ}\text{C}$ ) становить приблизно 7 % мас, а гранична кількість стабілізованого графіту досягається за температури ізотермічного гартування  $350^{\circ}\text{C}$ .



**Рис. 2. Мікроструктура бейнітного мідистого високоміцного чавуну (8,53 % мас., Cu): а)  $t_{iz}=350^{\circ}\text{C}$ ; б)  $t_{iz}=400^{\circ}\text{C}$ ; в)  $t_{iz}=450^{\circ}\text{C}$ . Травл. X 950**

Аналіз результатів зносостійкості дослідного чавуну показав, що параметри і вид термічної обробки суттєво впливають на опір руйнуванню дослідного сплаву при зношуванні в умовах тертя ковзання. Дослідження на зносостійкість в прийнятих умовах навантаження дозволили виявити тенденцію до покращення зносостійкості бейнітних з підвищенням вмісту міді при всіх температурах аустемперінгу. Найвищої зносостійкості набуває мідистий високоміцний чавун після ізотермічного гартування на структуру нижнього бейніту, яка складається із 50%  $\alpha$ - і 50%  $\gamma$ -фаз [2].

Результати рентгенівського аналізу параметрів субструктури по товщині приповерхневого робочого шару зразків (рис. 3) після проведення на зносостійкість приведені на рисунку. В межах похибки методики експерименту встановлено, що характер зміни параметрів субструктури для дослідних зразків відповідає відомій трибологічній схемі, де зносостійкість даної категорії Fe–C сплавів оцінюється в умовах тертя ковзання з тиском в зоні контакту  $\leq 2.5$  МПа.

На відстанях близьких до поверхні тертя спостерігаються максимальні мікродеформації  $\epsilon$ , фізичне фізичне уширення лінії (211)  $\alpha$ -фази  $\beta$  і мінімальні розміри блоків D при підвищеній густині дислокацій  $\rho$ .

Помітним є те, що із збільшенням товщини досліджуваного шару зростає розмір блоків і зменшується значення інших параметрів субструктури і вже при глибині шару 7,5 мкм значення параметрів субструктури і, зокрема, розміри блоків досягають величини вихідного стану.

Спостерігається відома хвилеподібна зміна параметрів субструктури по товщині приповерхневого шару, яка визначається циклічністю перебігу дисипативних процесів в поверхневих шарах тертя спряжених тіл. Негативний вплив процесів теплової і механічної дії на опір руйнуванню робочого шару суттєво нейтралізується формуванням дисипативних структур.

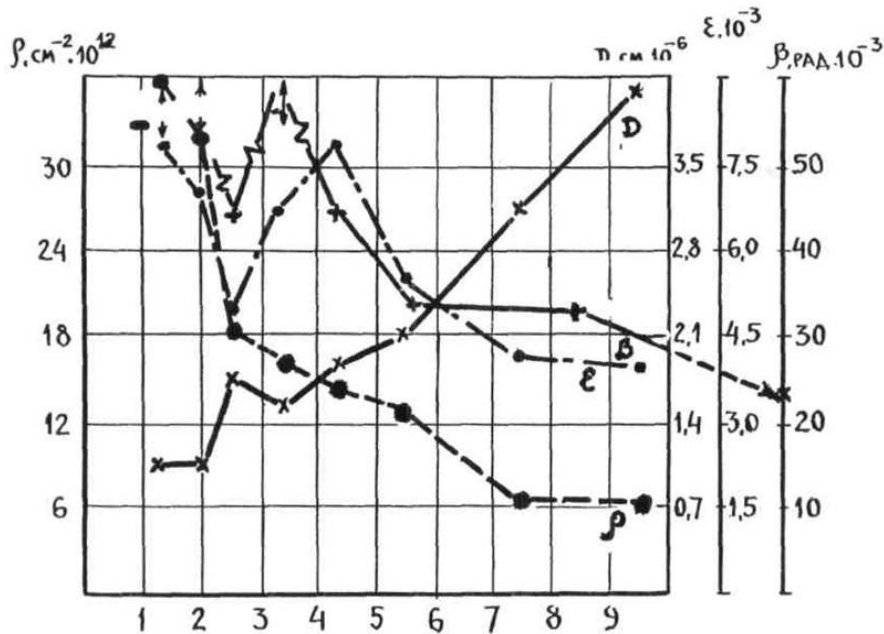


Рис. Зміна параметрів субструктури по глибині приповерхневого шару після випробування на стійкість проти спрацювання. Навантаження 2,5 МПа,  $V=1\text{ м/с}$ . ( $t_{\text{ауст}}=350^\circ\text{C}$ ,  $\text{Cu}=8.53\%\text{ мас}$ ).

Дисипація зовнішньої енергії пов'язана з утворенням нових динамічних станів і синергізмом об'єктів всіх структурних рівнів та в кінцевому випадку проявляється у теплових ефектах і виробництві ентропії. Спостереження фазового простору дослідної динамічної системи показує, що процес сомоорганізації дисипативних структур металеві матриці при зношуванні високоміцних мідистих чавунів повинен завершуватись утворення двох типів біфуркації.

Дисипативні складові, які утворюють високотемпературну біфуркацію ( $\gamma_1$ -і  $\gamma_2$ -фази) є стійкими, що визначається правилом виробництва ентропії  $d=0$ . Дисипативні структури з параметрами  $ds_{\gamma_1}$  та  $ds_{\gamma_2}$  знаходяться у стані рівноваги завдяки ефекту компенсації виробництва негативної ентропії  $ds_{\gamma_1} = -ds_{\gamma_2}$ . Ефект компенсації для мідистих високоміцних чавунів можливий, якщо припустити, що на момент утворення біфуркації  $\gamma_2$ -фази у її складі є впорядкована структура. Такий стан  $\gamma_2$ -фази може бути успадкований від одної із структурних складових основної матриці при особливих температурних і часових умовах дискретного контакту поверхні.

У металознавстві чавунів є відомості, що вказують на особливу структуру нижнього бейніту, який містить 50% стабілізованого аустеніту з впорядкуванням 2-го роду.

**Висновки.** Легування високоміцного чавуну міддю в кількості до 9% мас в поєднанні з оптимальним процесом термічної обробки дозволяє отримати дисипативні структури та підвищити зносостійкість виливок відповідального призначення. Найбільш високі параметри зносостійкості спостерігаються після обробки за температури ізотермічного гартування  $350^\circ\text{C}$ . Встановлено, що висока зносостійкість структури нижнього бейніту пов'язується з спільним впливом трибофаз ( $\Gamma$ - $\epsilon$ -фази) і легованого міддю аустеніту.

#### Список використаних джерел:

1. Бобро Ю.Г. Износостойкие литые композиты, синтезированные на основе серых чугунов // Ю.Г.Бобро, Д.А.Гусачук, И.А.Парфентьева, Н.В.Дмитриук // Процессы литья. – № 4. – 2004. – С.75-80.
2. Бобро Ю.Г., Дмитриук Н.В., Гусачук Д.А. Высокомедистые чугуны с шаровидным графитом. // Литейное производство. – М. – 1997. – №7 – с. 9-11.
3. Гусачук Д.А., Зносостійкі литі композитні матеріали, отримані на основі сірих чавунів / Д.А. Гусачук, І.О. Парфентьева, Н.П. Зайчук // Нові матеріали і технології в машинобудуванні: матеріали VII науково-технічної конференції, 21...22 травня 2015 р., м. Київ / загальна редакція Р.В. Лютий, І.М. Гурія. – Київ: НТУУ «КПШ», 2015. – С.161-163.
4. Бобро Ю.Г. Сьогодні і майбутнє чавунів як ливарних композитних матеріалів / Ю.Г.Бобро А.Ю.Бобро // Ідея. – № 4-5. – 1996/1997. – С.263-277
5. Бобро Ю.Г., Пивоваров В.М. Изотермическая закалка чугуна. – Харьков: Прапор. – 1968. – 112 с.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017