



Підвищення зносостійкості високоміцного чавуну

Л.Л. Костіна¹, М.В. Костікова²

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (м. Харків, Україна)
email: ¹ kostina4991@gmail.com, ² kmv_topaz@ukr.net;
ORCID: ¹ 0000-0001-7469-353X, ² 0000-0001-5197-7389

Проблема. Високоміцний чавун з кулястим графітом все частіше використовують для важко- та середньонавантажених деталей машин, що працюють в умовах тертя та зношування. Забезпеченню необхідних властивостей заважає структурна й хімічна неоднорідність чавуну, що утворюється в процесі його виробництва. Властивості можна покращити термічною обробкою або легуванням, або легуванням та термічною обробкою. **Мета** – Дослідження впливу комплексного мікролегування на структуру та властивості високоміцних чавунів, вибір оптимального складу з достатньою міцністю та зносостійкістю. **Метод.** Досліджені чавуни, модифіковані залізо-кремній-магнієвим сплавом, легувані різною кількістю нікелю та молібдену. Структура досліджена на металографічному та електронному мікроскопах, розподіл елементів на рентгенівському спектральному мікроскопі-аналізаторі. Визначення зносостійкості проводилось на машині тертя СМЦ-3. **Отримані результати.** Легування високоміцного чавуну нікелем та молібденом спочатку приводить до збільшення кількості високовуглецевої складової (перліта) в структурі, а потім навіть до появи троостита і бейніта в чавуні. Розташування троостита і бейніта по границям евтектичних зерен зумовлено розподілом основних елементів в матриці чавуну і значно збільшує міцність та зносостійкість чавуну. Максимальний знос чавуну 1 складає 0,719 г, а колодок – 0,362 г. Максимальний знос чавуну 2 складає 0,471 г, а колодок – 0,182 г. Максимальний знос чавуну 3 складає 0,210 г, а колодок – 0,090 г. Чавун 3 з найбільшою кількістю легуючих елементів (0,75% Ni, 0,58% Mo) має найбільшу зносостійкість. Найменшу зносостійкість має нелегований чавун 1. За рахунок зміни структури матриці та її відповідності принципу Шарпі комплексне мікролегування нікелем та молібденом дозволяє значно підвищити зносостійкість високоміцних чавунів. Чавун з найбільшою кількістю легуючих елементів найменше зношується. **Наукова новизна.** Встановлення характеру розподілу хімічних елементів (кремнію, магнію, нікелю, молібдена) в матриці високоміцного чавуну і відповідних процесів структуроутворення. Крім того, утворення троостита і бейніта по границям евтектичних зерен в досліджених чавунах пояснюється перенасиченням цих границь нікелем та молібденом. **Практичне значення.** Визначений оптимальний склад чавуну. Зменшення зносу високоміцного чавуну не викликає відповідного збільшення зносу сполучених деталей.

Ключові слова: високоміцний чавун з кулястим графітом, ліквіація, мікролегування, зносостійкість

Постановка проблеми та її актуальність. Зростання вимог до якості та довговічності деталей є причиною того, що останнім часом суттєво змінилась структура випуску чавунного лиття: випуск сіро-го чавуну помітно знижується, а високоміцного чавуну різко зростає. В передових промислових країнах доля високоміцного чавуну в загальному обсязі литва складає 50 ... 70%. Сьогодні в структурі світового випуску виливків чавунні складають 75%, сталеві – 9%. [1]. Значну долю чавунних виробів складають деталі з високоміцних чавунів з кулястим графітом (ВЧ). Ці чавуни використовують для середньо- і важконавантажених деталей: поршневі кільця, гільзи, шестірень, деталей двигунів, компресорів та ін.

Термічна обробка високоміцних чавунів дозволяє отримати зовсім новий комплекс властивостей, в якому значно вищі значення міцності поєднуються з досить високими показниками пластичності та ударної в'язкості. Правильно вибрані метод та режим термічної обробки високоміцного чавуну разом з раціонально складеним технологічним процесом виготовлення деталі дозволять значно підвищити довговічність останньої.

Середньонавантажени деталі в процесі роботи можуть витримувати одночасно різні види навантажень: статичні, динамічні, знакозмінні, циклічні та ін. і відповідно різні види руйнування. В більшості своїй вони також працюють на тертя та зношування. Тому велике значення має

забезпечення потрібної міцності, зносостійкості та довговічності цих виробів [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Властивості чавуну визначаються структурою мета-левої матриці, формою, кількістю і розташуванням графітних включень.

Високоміцні чавуни в литому стані відрізняються значною неоднорідністю структури, що, по-перше, знижує їх властивості; по-друге, визначає нерівномірність процесів та неоднорідність структури при подальшій обробці (термічній, зварюванням, різанням та ін.) [2, 3]. Особливості кристалізації металу дають дендритну, пошарову та зонну ліквацию. Чим більша кількість компонентів в сплаві, тим більше існує варіантів їх розподілу по матриці і тим складніше визначити їх поведінку. Процес формування хімічної неоднорідності при кристалізації визначається термодинамічними властивостями сплаву, кінетичними процесами тепло- та масообміну. Ці процеси залежать від коефіцієнтів дифузії хімічних елементів та термічного циклу обробки [4]. Безпосереднє вивчення процесів кристалізації й утворення ліквации ускладнено. В багатокомпонентному сплаві ускладнений теоретичний розрахунок параметрів неоднорідності – коефіцієнтів дифузії та розподілу елементів; він можливий тільки за значно спрощеною моделлю при багатьох припущеннях, що знижує практичну значимість таких розрахунків. Оцінку ліквации сучасними методами можна вважати напів'якісною.

В високоміцних чавунах звичайно основну роль відіграє ліквация в межах евтектичного зерна. Ліквация може бути прямою (збагачення даним елементом периферійної частини зерна) та зворотною (збагачення даним елементом центральної частини зерна) [5, 6].

Підвищити властивості ВЧ дозволяють легування, термічна обробка або поєднання легування та термічної обробки. Легуючі елементи забезпечують підвищення механічних властивостей. Молібден, ванадій, хром зміцнюють металеву матрицю. Роль нікелю і міді полягає в підвищенні кількості та дисперсності перлиту і вирівнюванні властивостей в тонких і товстих перерізах вилівка. Для середньонавантажених деталей не завжди доцільна термічна обробка; суттєвого підвищення їх властивостей можна досягти легуванням і навіть економним легуванням.

Мета і постановка завдання.

Мета роботи полягала в виборі оптимального складу високоміцного чавуну з достатньою міцністю та зносостійкістю.

Для цього потрібно було виконати такі задачі: дослідити вплив комплексного мікролегування різними кількостями легувальних елементів на структуру та властивості високоміцних чавунів.

Дослідження впливу мікролегування на властивості ВЧ. Чавун виплавляли в дуговій електро-печі на шихті з чавуну ЛКР-3. Після відкачки шлаку в печі перше модифікування проводили лігатурою ЗКМ-2 при температурі 1440оС. Після скачування шлаку вторинне модифікування проводили у ковші феросиліцієм ФС-75 з криолітом. Після повного розчинення феросиліцію чавун заливали у форми при температурі 1400 ... 1420оС. Для дослідження впливу мікролегування на властивості високоміцного чавуну проводили економне легування нікелем та молібденом. Металевий нікель та феромолібден вводили в розплав в електропіч після першого модифікування, згідно розрахунків шихти для отримання чавунів різного складу (табл. 1). Легуючі елементи вводили в різних кількостях задля дослідження їх впливу на структуру та властивості високоміцного чавуну.

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваного чавуну з кулястим графітом

№ чавуну	Вміст елементів, %					
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Mg
1	3,30	2,89	0,80	–	–	0,050
2	3,32	2,28	0,70	0,30	0,25	0,040
3	3,39	2,57	0,66	0,75	0,58	0,050

Вміст сірки в досліджених чавунах складав 0,0066%, вміст фосфору 0,060-0,068%.

Структуру досліджували за допомогою металографічного та електронного мікроскопів, розподіл елементів – на мікрорентгеноспектральному аналізаторі. Визначення зносостійкості проводили на стандартній машині тертя СМЦ-2.

В вихідному стані всі досліджені чавуни мали 80% графіту кулястої форми Гф 12, розміром Граз 45 ... 90 згідно ГОСТ 3443-79. Структура матриці нелегованого чавуну 1 перліто-феритна, перліта до 70%; чавуну 2 – перліто-феритна, перліта до 80%. Ферит розташований у вигляді оторочок навколо графітних включень. Структура матриці чавуну 3 перліто-троситна, з наявністю бейніту до 10%, та 10% фериту. Тобто збільшення вмісту нікелю та молібдену в чавуні призводить до збільшення вмісту високовуглецевої структурної складової, появи нерівноважних структур з високою міцністю та твердістю. Наявність високої кількості нікелю забезпечує високу ударну в'язкість (табл. 2).

Таблиця 2. Властивості досліджених чавунів в литому стані

№ чавуну	Механічні властивості			
	σ_b , МПа	δ , %	КС, Дж/см ²	НВ
1	700	4,0	22,0	229
2	730	3,9	32,0	241
3	810	3,7	36,0	272

Значна зворотна ліквідація кремнію в чавунах 1 і 2 запобігає повній перлітизації металевої матриці, і зберігаються феритні оторочки навкруги графітних включень. Ферит оторочок має вміст кремнію, помітно більший за середній в даному чавуні, тому при навантаженні руйнується крихко.

Збільшення концентрації легуючих елементів супроводжується зміною мікроструктури матриці: ліквідація кремнію зменшується, а ліквідація нікелю та молібдену збільшується.

Основна структура – перліто-тростит з окремими голками бейніту в ділянках евтектичних границь. Бейніт утворюється внаслідок пересичення евтектичних границь нікелем та молібденом. Марганець розташований за схемою прямої ліквідації, як і молібден, але величина ліквідації марганцю практично не змінюється в досліджених чавунах. Це оказує суттєвий вплив на зносостійкість чавунів (рис.1).

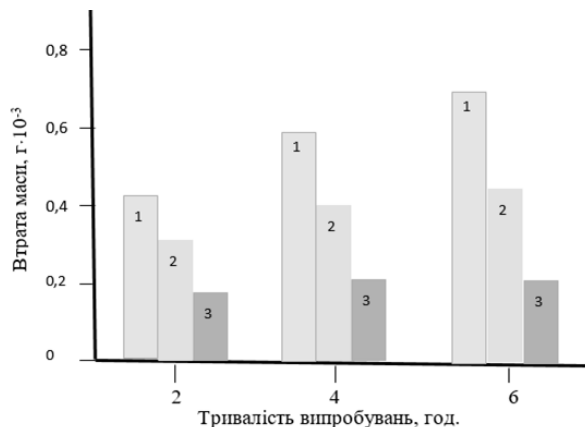


Рис. 1. Діаграма зношування роликів з чавунів □ 1 – ролик з 1; 2 – ролик з 2; 3 – ролик з 3

Максимальне зношування чавуну 1 складає 0,719 г, а колодочки – 0,362 г. Максимальне зношування чавуну 2 складає 0,471 г, а колодочки – 0,182 г. Максимальне зношування чавуну 3 складає 0,210 г, а колодочки – 0,090 г. Таким чином, найбільшу зносостійкість має чавун 3 з найбільшою кількістю легуючих елементів (0,75% Ni, 0,58% Mo). Найнижчу зносостійкість має нелегований чавун 1.

Отримані результати свідчать про те, що не дуже велике (на 20 ... 30 одиниць) підвищення твердості може давати подвійне зменшення зношування (втрати маси зразка) (рис.2).

Причиною цього є структурний склад чавунів. Збільшення кількості твердих складових – перліту, та поява нових – троститу та невеликої кількості бейніту насамперед збільшують гетерогенність структури, що з точки зору виконання принципу Шарпі (наявність в структурі твердих та м'яких складових) повинно збільшувати зносо-

стійкість деталі. По-друге, наявність троститу, що має більшу зносостійкість, та наявність бейніту, що є зносостійкою фазою та до того ж гальмує тріщини, підвищують зносостійкість чавуну.

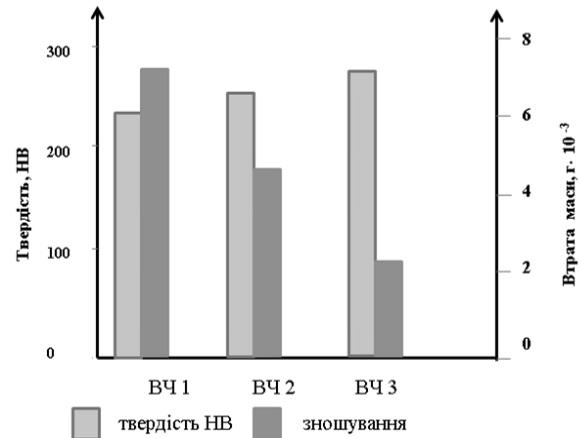


Рис. 2. Співставлення твердості ВЧ та величини його зношування

Висновки.

1. За рахунок зміни структури матриці та ліквідації мікролегуювання дозволяє помітно збільшити зносостійкість високоміцного чавуну.

2. Найбільшу зносостійкість має чавун 3 з найбільшою кількістю легуючих елементів (0,75% Ni, 0,58% Mo).

3. Зменшення зношування високоміцного чавуну не викликає відповідного підвищення зношування сполучених деталей.

4. Підвищення твердості на 20 ... 30 НВ може давати подвійне зменшення зношування.

Література:

1. Чугун. Справочник / Под редакцией А.А. Шермана и А. А. Жукова // М.: Металлургия, 1991. – 576 с.
2. В. К. Федюкин, Т. А. Лебедев, Т. К. Маринец Высокопрочный чугун как конструкционный материал / Федюкин В. К., Лебедев Т. А., Маринец Т. К. // Л.: Изд-во ЛПИ, 1974, 49 с.
3. Л. Л. Костіна Чавун з вермикулярним графітом: деякі закономірності структуроутворення і підвищення міцності / Костіна Л. Л. // Вестник ХНАДУ. - 2011. - Вып. 54. С. 142-148.
4. А. Н. Крутилин, Н. И. Бестужев, В. А. Стефанович, М. И. Курбатов Влияние термической обработки на структуру и свойства экономнолегированного высокопрочного чугуна / Крутилин А. Н., Бестужев Н. И., Стефанович В. А., Курбатов М. И. Литье и металлургия, № 1, 2008, С. 102–108.
5. Л. А. Солнцев, Л. Л. Костіна, А. И. Савон Некоторые особенности фазовых и структурных превращений в чугуне с вермикулярным графитом

том / Солнцев Л. А., Костина Л. Л., Савон А. И. // Изв. АН СССР, Металлы. – 1983, №2, С. 93–94.

6. А.Г. Клемешев, Л.А. Солнцев, Л.Л. Костина, В.П. Булыжин. Чугун с шаровидным графитом с повышенной усталостной прочностью / Клемешев А.Г., Солнцев Л.А., Костина Л.Л., Булыжин В.П. // ЦНТИ, – 1990, № 90-008, С. 1–3.

References:

1. Sherman, A. and Zhukov, A. (1991) Chugun. Spravochnik. M.: Metallurgija. 576 p.

2. Fedjukin, V., Lebedev, T. and Marinec, T. (1974) Vysokoprochnyj chugun kak konstrukcionnyj material. L.: Izd-vo LPI. 49 p.

3. Kostina, L. (2011) "Chavun z vermikuljarnym hrafitom: deiki zakonmirnosti strukturoutvorennia

ii pidvyshchennia mitsnosti", Vestnyk KhNADU, (54), pp. 142–148.

4. Krutilin, A., Bestuzhev, H., Stefanovich, V. and Kurbatov, M. (2008) "Vlijanie termicheskoj obrabotki na strukturu i svojstva jekonomno-legirovannogo vysokoprochnogo chuguna", Lit'e i metallurgija, (1), pp. 102–108.

5. Solncev, L., Kostina, L. and Savon, A. (1983) "Nekotorye osobennosti fazovyh i strukturnyh prevrashhenij v chugune s vermikuljarnym grafitom", Izv. AN SSSR, Metally, (2), pp. 93–94.

6. Klemeshev, A., Solncev, L., Kostina, L. and Bulyzhin, V. (1990) "Chugun s sharovidnym grafitom s povyshennoj ustalostnoj prochnost'ju", CNTI, (90-008), pp. 1–3.

Аннотация

Повышение износостойкости высокопрочного чугуна

Л.Л. Костина, М.В. Костикова

Проблема. Высокопрочный чугун с шаровидным графитом все чаще используют для тяжело- и средненагруженных деталей машин, работающих в условиях трения и износа. Обеспечению необходимых свойств препятствует структурная и химическая неоднородность чугуна, образующаяся в процессе его производства. Свойства могут быть улучшены термической обработкой или легированием, сочетанием легирования с термообработкой. **Цель** - Исследование влияния комплексного микролегирования на структуру и свойства высокопрочных чугунов, выбор оптимального состава с достаточной прочностью и износостойкостью. **Метод.** Исследуемые чугуны, модифицированные железо-кремний-магний-молибденовым сплавом, легированные разным количеством никеля и молибдена. Структура исследована на металлографическом и электронном микроскопах, распределение элементов на рентгеновском спектральном микроскопе-анализаторе. Определение износостойкости проводилось на машине трения СМЦ-3. **Полученные результаты.** Легирование высокопрочного чугуна никелем и молибденом сначала приводит к увеличению количества высокоуглеродистой составляющей (перлита) в структуре, а затем даже к появлению троостита и бейнита в чугуне. Расположение троостита и бейнита по границам эвтектических зёрен обусловлено распределением основных элементов в матрице чугуна и значительно увеличивает прочность и износостойкость чугуна. Максимальный износ чугуна 1 составляет 0,719 г, а колодок – 0,362 г. Максимальный износ чугуна 2 составляет 0,471 г, а колодок - 0,182 г. Максимальный износ чугуна 3 составляет 0,210 г, а колодок – 0,090 г. Чугун 3 с наибольшим количеством легирующих элементов (0,75% Ni, 0,58% Mo) обладает наибольшей износостойкостью. Наименьшей износостойкостью обладает нелегированный чугун 1. За счет изменения структуры матрицы и ее соответствия принципу Шарпи сложное микролегирование никелем и молибденом позволяет значительно повысить износостойкость высокопрочных чугунов. Чугун с наибольшим количеством легирующих элементов наименее подвержен износу. **Научная новизна.** Установление характера распределения химических элементов (кремния, магния, никеля, молибдена) в матрице высокопрочного чугуна и соответствующих процессов структурообразования. В частности, образование троостита и бейнита по границам эвтектических зёрен в исследованных чугунах объясняется перенасыщением этих границ никелем и молибденом. **Практическое значение.** Определен оптимальный состав чугуна. Снижение износа высокопрочного чугуна не вызывает соответствующего увеличения износа сопряженных деталей.

Ключевые слова: высокопрочный чугун с шаровидным графитом, ликвация, микролегирование, износостойкость

Abstract

Wear Resistance of the Ductile Cast Iron Increasing

L.L. Kostina, M.V. Kostikova

Problem. Ductile cast irons with spheroidal graphite are increasingly used for heavy and medium-loaded machine parts operating under conditions of friction and wear. Providing the necessary wear resistance is hampered by the structural and chemical heterogeneity of cast iron, which are formed in the process of its production. The properties can be improved by heat treatment or alloying, a combination of alloying with heat

treatment. **Goal** - Investigation of the effect of complex microalloying on the structure and properties of high-strength cast irons, selection of the optimal composition with sufficient strength and wear resistance. **Method**. Used cast irons modified with iron-zo-silicon-magnesium alloy, alloyed with different amounts of nickel and molybdenum. The structure was investigated using metallographic and electron microscopes, the distribution of elements on a X-ray spectral microscope analyzer. Determination of wear resistance was carried out on a standard SMZ-2 friction machine. **Results**. Alloying ductile iron with nickel and molybdenum first leads to an increase in the amount of a high-carbon component (pearlite) in the structure, and then even to the appearance of troostite and bainite in cast iron. The location of troostite and bainite along the boundaries of eutectic grains is due to the distribution of the main elements in the cast iron matrix, and significantly increases the strength and wear resistance of cast iron. The maximum wear of cast iron 1 is 0.719 g, and the pads – 0.362 g. The maximum wear of cast iron 2 is 0.471 g, and the pads – 0.182 g. The maximum wear of cast iron 3 is 0.210 g, and the pads – 0.090 g. Cast iron 3 with the largest number of alloying elements (0.75% Ni, 0.58% Mo) have the highest wear resistance. The lowest wear resistance has undoped cast iron 1. Due to the change in the structure of the matrix and its compliance with the Charpy principle, the complex microalloying with nickel and molybdenum makes it possible to significantly increase the wear resistance of high-strength cast iron. Cast iron with the highest amount of alloying elements is the least susceptible to wear. **Scientific novelty**. Establishing the nature of the distribution of chemical elements (silicon, magnesium, nickel, molybdenum) in the matrix of high-strength cast iron and the corresponding processes of structure formation. In particular, the formation of troostite and bainite along the boundaries of eutectic grains in the studied cast irons is explained by the oversaturation of these boundaries with nickel and molybdenum. **Practical significance**. The optimal composition of cast iron is determined. Reducing the wear of high-strength cast iron does not cause a corresponding increase in wear of the connected parts.

Keywords: *ductile cast irons, liquation, complex microalloying, wear resistance*

Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard

Kostina, L.L. and Kostikova, M.V. (2022). Wear Resistance of the Ductile Cast Iron Increasing. *Engineering of nature management*, (1(23), pp. 35 - 39.

Подано до редакції / Received: 20.11.2021