

В. І. Савуляк¹
Г. А. Грига²
А. А. Осадчук¹

ПОЛІПШЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СІРИХ ЧАВУНІВ ТЕРМООБРОБКОЮ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ

¹Вінницький національний технічний університет;

²Підприємство «Green Coob», Вінниця

Розглянуто технологію термічної обробки сірих чавунів з метою поліпшення їх механічних характеристик шляхом реалізації бейнітного перетворення металевої матриці. Запропоновано використовувати для запуску процесу трансформування аустеніту матриці сірого чавуну у бейніт екологічно безпечну технологію гартування «у двох водах» без застосування шкідливих для екології ванн з розплавленими сплавами або солями, а подальший повний або частковий ізотермічний розпад аустеніту вести в повітряних печах. Це не тільки поліпшує екологічні показники технологічного процесу, але і значно здешевлює його. Визначення раціональних параметрів технологічного процесу термічної обробки сірих чавунів здійснено із застосуванням методики планування та реалізації багатофакторного експерименту. Адекватність результатів, отриманих внаслідок вимірювань з реалізацією паралельних експериментів, перевірялась з використанням критерію Стюдента і задовольнила вимоги, а також дозволила відкинути малозначимі члени рівняння регресії. Проведено перевірку регресійної моделі впливу параметрів процесу на твердість термічно загартованого чавуну з використанням критерію Фішера, яка показала її адекватність. Виконання експериментальних досліджень з визначення факторів, які визначають міцність гартованих на бейніт сірих чавунів дозволило встановити раціональні часові параметри термічної обробки. Показано, що час витримки в печі при 850 °С перед охолодженням та час витримки в печі з температурою 400 °С в процесі розпаду аустеніту доцільно обмежити 30 хвилинами. Реалізація технології термічної обробки з визначеними параметрами для поліпшення якості литва, що масово виробляється на заводах регіону, дозволила підвищити міцність на стиск чавуну в 1,5 рази, твердість поверхні в 2 рази, а марку чавуну підняти з СЧ20 до СЧ25—СЧ30. При цьому вдалося забезпечити зменшення викидів парів солей, металів та інших продуктів взаємодії розплавів з атмосферою.

Ключові слова: сірий чавун, металева матриця, гартування на бейніт, багатофакторний експеримент, твердість, граничні напруження, рівняння регресії.

Вступ

Широке використання чавунів у промисловості пояснюється їх хорошими технологічними та експлуатаційними властивостями. До технологічних переваг насамперед слід віднести економічність одержання заготовок литтям та оброблюваність різанням, а до експлуатаційних — антифрикційність, зносостійкість, стійкість проти утворення задирок, високі демпфувальні властивості тощо. Корпусні деталі з чавуну можуть мати міцність на рівні сталевих, високу протидію абразивному та корозійному зношуванню, дозволяють якісно працювати в парах ковзання зі сталевими, менш чутливі до наявності концентраторів напружень на поверхнях.

Чавун вважають природним композитом, у якого дві основні складові забезпечують переважну більшість властивостей: це металева матриця на основі заліза та неметалеві включення. Металева матриця у чавуні, у його розгляді як композиту, відіграє роль в'язучого та формує міцність на розтяг, частково на стиск, пластичність, впливає на рух і взаємодію дислокацій та деякі інші властивості. Велика кількість можливих стабільних та метастабільних фазово-структурних станів матриці дозволяє розглядати її як складну систему з великою кількістю входів та виходів,

практично реалізовувати широку гаму необхідних властивостей чавунних деталей та їх окремих робочих поверхонь. Сірий чавун (СЧ) є найдешевшим залізвуглецевим сплавом з прийнятними у багатьох випадках міцністю та технологічними ливарними властивостями. Поліпшити співвідношення ціна/якість чавунів можливо за рахунок формування оптимального структурного стану їх матриці. Особливу актуальність це завдання має для сірих чавунів.

В роботі [1] розглянуто вплив наявності бейніту в матриці сірого чавуну і показано, що це дозволяє суттєво впливати на допустимі напруження та ударну міцність деталей. З урахуванням сказаного актуальним постає завдання пошуку раціональних способів впливу на властивості сірих чавунів з метою підвищення їх механічних властивостей та зносостійкості без суттєвого підвищення їх собівартості. Одним з можливих варіантів отримання необхідного результату є гартування СЧ на бейніт з високим вмістом аустеніту та підвищеною твердістю. Таке поєднання структурних складових дозволяє підвищувати їх ударну міцність внаслідок високої в'язкості аустеніту. Крім того, наявність метастабільного аустеніту дозволяє розсіювати на фазові перетворення частину потоку енергії, яка утворюється в матеріалі деталі від процесів тертя, що також підвищує зносостійкість робочих поверхонь.

Другим важливим фактором позитивного впливу на зносостійкість чавунних деталей є висока твердість робочих поверхонь. При цьому у багатьох випадках необхідно забезпечити відсутність у структурі великих кристалів цементиту. А для цього потрібно призначити відповідні режими термічної обробки.

Традиційні технології гартування на бейніт [2] використовують під час термічної обробки операції ізотермічної витримки чавуну в розплавах металів або солей. Під час цієї витримки відбувається розпад аустеніту та утворення бейнітної структури матриці. Перевагу надають ізотермічному гартуванню у ваннах з розплавленим цинком. Сталість температури ванни забезпечується частими замінами частини металу добавками такого ж твердого металу або солі з температурою навколишнього середовища. У такий спосіб проводиться гартування в двофазному «рідинно-твердому» ізотермічному середовищі. Отриманий бейнітний чавун показує високі показники оброблюваності різанням лезовими інструментами, що пояснюється наявністю пластинчастого графіту. Фактично бейніт у такому чавуні складається з перенасиченого вуглецем α' -розчину і збагаченого вуглецем і стабілізованого ним аустеніту [3]. У разі швидкого перенесення деталей з цинкової ванни в повітряну піч для ізотермічного розпаду аустеніту оцинкування поверхні чавуну практично не відбувається.

Недоліком цієї технології є використання гартувальних ванн з рідкими металевими розплавами, наприклад цинком, що підвищує собівартість гартування та негативно впливає на навколишнє середовище.

Метою роботи є вдосконалення технології термічної обробки сірих чавунів задля підвищення їх міцності та зносостійкості, екологічної безпеки, забезпечення економічності виробництва заготовок шляхом обґрунтування температурно-часових режимів на основі отриманих регресійних моделей.

Методика і результати дослідження

Для гартування чавуну на бейніт доцільно розглянути ефективність використання технології термообробки «у двох водах» [4]. Досліджувану чавунну деталь з чавуну нагрівають у печі до 850...900 °С, а потім на короткий час послідовно опускають у ємність з холодною, а потім з киплячою водою. Після цього деталь переноситься у повітряну піч для ізотермічного розпаду аустеніту на бейніт, де її витримують необхідний час.

Опосередкованою характеристикою структурних перетворень в матриці чавуну з утворенням бейніту можна вважати зміну її твердості [5]. Побудуємо регресійну модель впливу технологічних факторів запропонованої термічної обробки сірого чавуну на його твердість. Застосуємо для цього метод планування багатофакторного експерименту з цільовою функцією – твердість, HV. За даними, опублікованими в роботі [4], найвпливовішими факторами на цю цільову функцію є час витримки чавуну в печі за 850 °С, час витримки чавуну в киплячій воді та час витримки чавуну в печі за 400 °С для ізотермічного розпаду аустеніту з виділенням бейніту. В табл. 1 наведені фактори впливу на технологічний процес термічної обробки та інтервали їх варіювання, а в табл. 2 — план та результати виконаної серії експериментів.

Фактори впливу на технологічний процес термічної обробки чавунів та інтервали їх варіювання

Фактори	Рівні факторів			Інтервал
	-1	0	+1	
Час t_1 витримки чавуну в печі за $t = 85\text{ }^\circ\text{C}$ — X_1 , хв	30	40	50	10
Час t_2 витримки чавуну в киплячій воді — X_2 , с	5	10	15	5
Час t_3 витримки чавуну в печі за $t = 400\text{ }^\circ\text{C}$ — X_3 , хв	30	40	60	15

Таблиця 2

Матриця планування та результати експериментів

№ дослідження	X_1	X_2	X_3	Y	X_{12}	X_{13}	X_{23}	X_0	X_{123}	y
1	+1	+1	+1	391,41	+1	+1	+1	+1	+1	398,87
2	-1	+1	+1	436,79	-1	-1	+1	+1	-1	432,94
3	+1	-1	+1	387,27	-1	+1	-1	+1	-1	379,81
4	-1	-1	+1	448,15	+1	-1	-1	+1	+1	451,99
5	+1	+1	-1	458,48	+1	-1	-1	+1	-1	455,06
6	-1	+1	-1	428,94	-1	+1	-1	+1	+1	436,82
7	+1	-1	-1	432,59	-1	-1	+1	+1	+1	436,01
8	-1	-1	-1	463,76	+1	+1	+1	+1	-1	455,88
9	0	0	0	419,64	—	—	—	—	—	—
10	0	0	0	426,88	—	—	—	—	—	—
11	0	0	0	402,34	—	—	—	—	—	—
12	0	0	0	399,01	—	—	—	—	—	—
13	0	0	0	405,72	—	—	—	—	—	—
14	0	0	0	409,13	—	—	—	—	—	—

За стандартними методиками [6] визначасмо коефіцієнти регресії для кодованих значень та напишемо рівняння регресії для кодованих значень параметрів

$$y = 430,92 - 13,48X_1 - 2,02X_2 - 15,02X_3 + 9,53X_1 X_2 - 13,08 X_1 X_3 + 0,21 X_2 X_3 - 5,65 X_1 X_2 X_3.$$

Критерій Стюдента для кожного з параметрів рівняння регресії обчислюємо за виразом [6]

$$t_j = \frac{b_j \sqrt{k+1}}{S_{\text{відг}}}, \quad (1)$$

де k — порядковий номер коефіцієнта регресії.

$$t_0 = \frac{430,92\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 113,64; \quad t_1 = \frac{13,48\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 3,55; \quad t_2 = \frac{2,02\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 0,53; \quad t_3 = \frac{15,02\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 3,96;$$

$$t_{12} = \frac{9,53\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 2,51; \quad t_{13} = \frac{13,08\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 3,45; \quad t_{23} = \frac{0,21\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 0,056; \quad t_{123} = \frac{5,65\sqrt{7+1}}{\sqrt{115,03}} = 1,49;$$

Визначаємо значення числа ступенів вільності дисперсії адекватності і дисперсії відтворюваності

$$f_1 = N - d, \quad (2)$$

де d — кількість значимих коефіцієнтів регресії, N — кількість дослідів, в яких змінювались параметри.

$$f_1 = 8 - 4 = 4.$$

$$f_2 = n_0 - 1, \quad (3)$$

де n_0 — число повторних дослідів.

$$f_2 = 6 - 1 = 5; \quad t(5) = 2,571.$$

Такі значення t -критеріїв Стьюдента дозволили визначити значущість коефіцієнтів у рівнянні регресії та відкинути малозначущі [7]. Після відкидання незначущих ефектів взаємодії отримуємо:

$$y \approx 430,92 - 13,48X_1 - 15,02X_3 + 9,53X_1X_2 - 13,08X_1X_3.$$

Розрахунок критерію Фішера показав значення 0,5, що вказує на адекватність регресійної моделі. Коефіцієнти регресії для дійсних значень параметрів:

$$X_j = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_j}. \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y &\approx 430,92 - 13,48 \left(\frac{X_1 - 40}{10} \right) - 15,02 \left(\frac{X_3 - 40}{15} \right) + 9,53 \left(\frac{X_1 - 40}{10} \right) \left(\frac{X_2 - 10}{5} \right) - 13,08 \left(\frac{X_1 - 40}{10} \right) \left(\frac{X_3 - 40}{15} \right) = \\ &= 461,61 - 6,73X_1 - 7,62X_2 - 4,48X_3 + 0,19X_1X_2 - 0,09X_1X_3. \end{aligned}$$

Після обчислення та переходу до фізичних параметрів процесу гартування сірого чавуну отримуємо регресійну модель, яка описує залежність твердості гартованого на бейніт сірого чавуну від технологічних параметрів

$$HV = 461,61 - 6,73t_1 - 7,62t_2 - 4,48t_3 + 0,19t_1t_2 - 0,09t_1t_3. \quad (5)$$

Рівняння регресії (5), отримане з використанням плану багатofакторного експерименту, дозволяє визначати твердість загартованого на бейніт чавуну СЧ-20 як функцію режимів термічної обробки: часу t_1 витримки чавуну в печі за температури 850 °С часу t_2 витримки чавуну в киплячій воді; часу t_3 витримки чавуну в печі за температури 400 °С. Встановлено, що підвищення твердості внаслідок гартування чавуну найбільше залежить від часу витримки чавуну в печі за температури розпаду аустеніту (400 °С), а на зменшення твердості та підвищення в'язкості — часу витримки чавуну в киплячій воді.

Гартування на бейніт дозволяє, крім твердості, також суттєво збільшити міцність на стиск чавуну (у нашому випадку сірого). На рис. 1 показано вплив часу витримки чавуну СЧ20 в печі за температури 850 °С на його міцність на розтяг. Збільшення часу витримки до 30 хвилин значно зміцнює чавун і може підняти його марку до СЧ25—СЧ30. Подальша витримка чавуну в печі за цієї температури недоцільна і лише збільшує енерговитрати.

Результати вивчення впливу на міцність чавуну часу витримки в печі для розпаду аустеніту за температури 400 °С показані на рис. 2. Повнота розпаду аустеніту також достатньо відчутно може підвищити міцність чавуну та його марку.

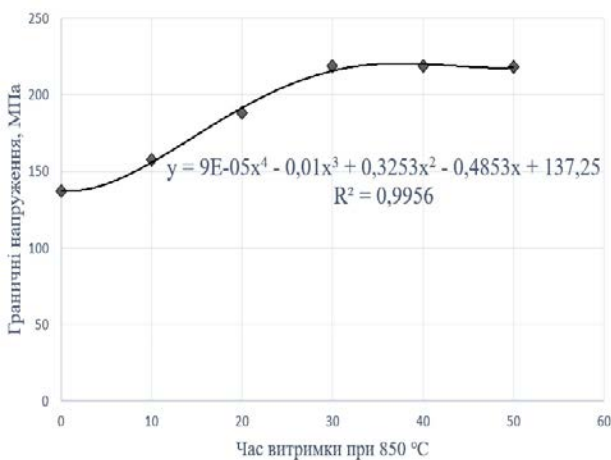


Рис. 1. Вплив витримки в печі за 850 °С на міцність сірого чавуну на розтяг

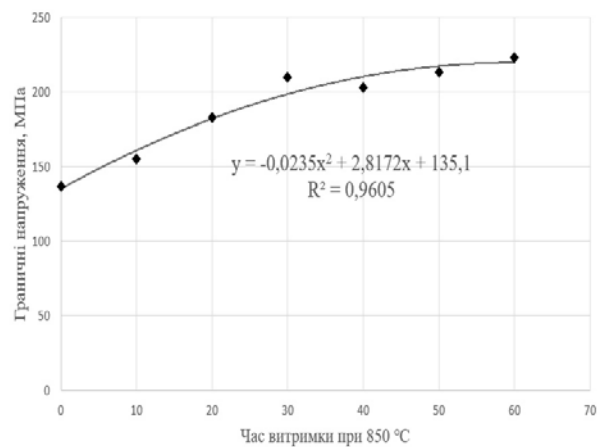


Рис. 2. Вплив витримки в печі під час розпаду аустеніту з температурою 400 °С на граничне напруження розтягу сірого чавуну

Висновки

1. Витримка у печі за температури 850 °С протягом 30 хв. підвищує міцність сірого чавуну. При цьому допустимі напруження стиску зростають з 130...140 до 210...220 МПа, а подальше збільшення витримки практично не збільшує цю міцність, а навіть і дещо зменшує внаслідок збільшення розмірів зерна.

2. Витримка у печі за температури 400 °С протягом 30 хв також підвищує міцність сірого чавуну, але використання лише цього фактору недостатньо для повного бейнітного перетворення і досягнення максимальної міцності.

3. Вплив параметрів гартування на твердість робочих поверхонь деталей з бейнітного чавуну адекватно відображається рівнянням регресії

$$HV = 461,61 - 6,73t_1 - 7,62t_2 - 4,48t_3 + 0,19t_1t_2 - 0,09t_1t_3.$$

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. І. Савуляк, та О. Б. Янченко, *Економічні технології високоміцних графітованих сплавів заліза*. Вінниця: ВНТУ, 2014, 160 с.
- [2] С. М. Волощенко, К. О. Гогаєв, М. Г. Аскеров, та Ю. М. Подрезов, «Особливості бейнітного високоміцного чавуну з огляду виробництва швидкозношуваних змінних деталей ґрунтообробної сільгосптехніки,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4 (133), 2017.
- [3] V. I. Savulyak, A. A. Zhukov, T. F. Arhipova, "Cellular precipitation of excessive phase during the start of bainitic transformation," *Бюлетень політехнічного інституту*, Яси, № 3, с. 4, 2000.
- [4] В. І. Савуляк, и О. Б. Янченко, «Повышение триботехнических свойств чугунов с мелкозернистым компактным графитом бейнитной закалкой,» *Проблеми трибології*, № 1, с. 135-138, 2012.
- [5] С. З. Бокштейн, *Строение и свойства металлических сплавов*. Москва: Металлургия, 1971, 496 с.
- [6] К. Хартман и др., *Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов*. Москва: Мир, 1977. 552 с.
- [7] В. В. Плешаков, *Методы и модели исследования операций. Регрессионное моделирование технологических систем*. Москва: МГТУ «Станкин», 1996. 100 с.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 28.12.2018

Савуляк Валерій Іванович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, e-mail: korsav84@gmail.com ;

Осадчук Андрій Андрійович — аспірант кафедри галузевого машинобудування, e-mail: os.andrey2@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Грига Ганна Анатоліївна — інженер, e-mail: Anna_Lichman@ukr.net ;

Підприємство «Green Coob», Вінниця

V. I. Savuliak¹
H. A. Hryha²
A. A. Osadchuk¹

Improvements of Mechanical Characteristics of Gray Cast Iron by Heat Treatment and Justification of Its Parameters

¹Vinnitsia National Technical University;

²“Green Coob” Company, Vinnitsia

The article discusses the technology of heat treatment of gray cast irons in order to improve their mechanical characteristics by implementing a bainitic transformation of the metal matrix. It is proposed to use the environmentally safe technology of hardening "in two waters" to start the process of transformation of austenite of a gray cast iron matrix into bainite without using environmentally harmful baths with molten alloys or salts, and further complete or partial isothermal decomposition of austenite in air furnaces. This not only improves the environmental performance of the process, but also significantly reduces the cost of it. The definition of rational parameters of the process of heat treatment of gray cast irons was carried out using the method of planning and implementing a multifactor experiment. The adequacy of the results obtained as a result of measurements with the implementation of parallel experiments was checked using Student's criterion and satisfied the requirements, and also allowed to discard insignificant members of the regression equation. The regression model of the

influence of process parameters on the hardness of thermally hardened cast iron was tested using the Fisher criterion, which showed its adequacy. Experimental studies to determine the factors that determine the strength of gray cast iron hardened to bainite made it possible to establish rational temporal parameters of heat treatment. It is shown that the exposure time in the furnace at 850 °C before cooling and the exposure time in the furnace with a temperature of 400 °C in the process of austenite decomposition should be limited to 30 minutes. The implementation of heat treatment technology with certain parameters to improve the quality of casting, mass produced at the plants of the region, allowed to increase the compressive strength of cast iron by 1.5 times, the surface hardness by 2 times, and the brand of cast iron to increase from SCH20 to SCH25—SCH30. At the same time, it was possible to reduce emissions of vapors of salts, metals and other products of the interaction of melts with the atmosphere.

Keywords: gray iron, metal matrix, quenching on bainite, multifactorial experiment, hardness, boundary stress, regression equation.

Savuiak Valerii I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Branch Engineering, e-mail: korsav84@gmail.com ;

Hryha H. A. — Engineer, e-mail: Anna_Lichman@ukr.net ;

Osadchuk A. A. — Post-graduate Student of the Chair of Branch Engineering, e-mail: os.andrey2@gmail.com

В. И. Савуляк¹

А. А. Грига¹

А. А. Осадчук¹

Улучшения механических характеристик серых чугунов термообработкой и обоснование ее параметров

¹Вінницький національний технічний університет;

²Предприятие «Green Coob», Винница

Рассмотрены технологии термической обработки серых чугунов с целью улучшения их механических характеристик путем реализации бейнитного преобразования металлической матрицы. Предложено использовать для запуска процесса трансформации аустенита матрицы серого чугуна в бейнит экологически безопасную технологию закаливания «в двух водах» без применения вредных для экологии ванн с расплавленными сплавами или солями, а дальнейший полный или частичный изотермический распад аустенита вести в воздушных печах. Это не только улучшает экологические показатели технологического процесса, но и значительно удешевляет его. Определение рациональных параметров технологического процесса термической обработки серых чугунов осуществлено с применением методики планирования и реализации многофакторного эксперимента. Адекватность результатов, полученных в результате измерений с реализацией параллельных экспериментов, проверялась с использованием критерия Стьюдента и удовлетворила требования, а также позволила отбросить малозначимые члены уравнения регрессии. Проведена проверка регрессионной модели влияния параметров процесса на твердость термически закаленного чугуна с использованием критерия Фишера, которая показала ее адекватность. Выполнение экспериментальных исследований по определению факторов, определяющих прочность закаливаемых на бейнит серых чугунов позволили установить рациональные временные параметры термической обработки. Показано, что время выдержки в печи при 850 °C перед охлаждением и время выдержки в печи с температурой 400 °C в процессе распада аустенита целесообразно ограничить 30 минутами. Реализация технологии термической обработки с определенными параметрами для улучшения качества литья, массово производимого на заводах региона, позволила повысить прочность на сжатие чугуна в 1,5 раза, твердость поверхности в 2 раза, а марку чугуна поднять с СЧ20 до СЧ25—СЧ30. При этом удалось обеспечить уменьшение выбросов паров солей, металлов и других продуктов взаимодействия расплавов с атмосферой.

Ключевые слова: серый чугун, металлическая матрица, закаливание на бейнит, многофакторный эксперимент, твердость, предельные напряжения, уравнение регрессии.

Савуляк Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры отраслевого машиностроения, e-mail: korsav84@gmail.com ;

Осадчук Андрей Андреевич — аспирант кафедры отраслевого машиностроения, e-mail: os.andrey2@gmail.com ;

Грига Ганна Анатолієвна — інженер, e-mail: Anna_Lichman@ukr.net