

ФРИКЦІЙНЕ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІЗ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Лалазарова Н. О.¹, Чигрин А. О.¹, Мачан І. С.¹, Афанасьєва О. В.², Попова О. Г.³

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет,

²Харківський національний університет радіоелектроніки,

³Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

***Анотація.** Деякі деталі двигунів, що працюють в умовах значних навантажень, тертя і зношування, виготовляють із високоміцного чавуну з кулястим графітом. Оскільки термін експлуатації деталей залежить від якісного стану поверхневого шару, який формується на операціях технологічного процесу виготовлення виробів, то досліджували вплив тертя як теплового джерела концентрованого потоку енергії на якість зміцненого шару. Визначена оптимальна величина поздовжньої подачі, що забезпечує мінімальну шорсткість, максимальну твердість і глибину білого шару для чавунів з різною мікроструктурою в процесі фрикційного зміцнення.*

***Ключові слова:** високоміцний чавун, фрикційне зміцнення, мікротвердість, мартенсит, товщина зміцненого шару, білий шар.*

Вступ

Одним із найбільш придатних конструкційних матеріалів для застосування в автотракторобудуванні, суднобудуванні, загальному машинобудуванні й залізничному транспорті є високоміцний чавун з кулястим графітом (ВЧКГ) [1, 2]. Його використовують у транспортному машинобудуванні замість литої та кованої сталі для виготовлення деталей складної форми – колінчастих і розподільчих валів, блоків і кришок блоків циліндрів [2]. Майже всі деталі, що виготовляють з високоміцного чавуну, працюють в умовах тертя та зношування.

Термін експлуатації деталей залежить від якісного стану їхнього поверхневого шару, що формується під час технологічного процесу виготовлення виробів.

На сьогодні розробляються технологічні процеси нанесення різноманітного типу покриттів та модифікування поверхневого шару деталей, які суттєво впливають на структуру та властивості. Для зміни структури та властивостей найбільш важливими є ті методи оброблення, які як теплове джерело енергії використовують концентровані потоки енергії. Актуальною є проблема вибору технологічного процесу, який забезпечує необхідну якість поверхневого шару чавунних виробів і не потребує суттєвих витрат енергетичних ресурсів.

Аналіз публікацій

На заключних операціях технологічного процесу виготовлення деталі формується як-

ість поверхневого шару: мікроструктура, фазовий і хімічний склад, залишкові напруження, параметри шорсткості, що так само визначає експлуатаційні властивості виробів.

У технологічних процесах виготовлення деталей та їх відновлення основними є операції поверхневого зміцнення, за допомогою яких можна отримати потрібні характеристики якості поверхневого шару без додаткового оброблення.

До способів зміцнювального оброблення належать способи поверхневого пластичного деформування (ППД) [3, 4], під час яких формується зміцнений поверхневий шар із показниками якості, що змінюються в широкому діапазоні: глибина зміцнення – 0,1–1,5 мм, підвищення твердості зміцненого шару – до 20–150 %, величина напружень, що стискаються, – 200–1400 МПа.

Під час оброблення ППД найбільш перспективною є можливість створення залишкових напружень та зміцненої структури в поверхневому шарі з більшою глибиною завдяки застосуванню методу вібраційного деформування, який використовує для навантаження енергію удару певної амплітуди і частоти робочого органу, що обробляє. Найбільший ступінь зміцнення досягається під час оброблення вуглецевих сталей; леговані сталі менш схильні до зміцнення.

Вібраційно-відцентровим зміцненням (ВВЗ) у зміцнених шарах сталей 35 та 40Х формують підвищений рівень залишкових напружень [5]. У разі оптимальної тривалості зміцнення в діапазоні 25–30 хв для сталі

35 забезпечуються максимально досяжні колові напруження стискання до 1450 МПа, а для сталі 40Х – до 1600 МПа.

У роботі [6] наведені результати випробувань на зносостійкість сірого чавуну марки СЧ20 після оброблення тертям – фрикційного зміцнення. Фрикційне зміцнення забезпечує формування на поверхні деталі білого шару із нанокристалічною структурою, що так само забезпечує підвищення зносостійкості під час граничного терті та за питомого навантаження 2 МПа майже в 8 разів. Шорсткість поверхні після фрикційного зміцнення становить 0,25–0,5 мкм.

У роботі [7] наведені оптимальні параметри фрикційного зміцнення зразків сталей плоскої і циліндричної форм у різному вихідному стані.

Таким чином, фрикційне оброблення – це метод поверхневого зміцнення, що забезпечує високу якість поверхневого шару: істотне підвищення мікротвердості та формування потрібних величин шорсткості. Цей метод зміцнення є достатньо економічним і простим у реалізації, не потребує складного обладнання, суттєвих витрат енергетичних ресурсів.

Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідження особливостей фрикційного зміцнення високоміцного чавуну з різною мікроструктурою для отримання якісного поверхневого шару. Для досягнення цієї мети були вирішені такі завдання: 1) визначення оптимальної величини поздовжньої подачі під час фрикційного оброблення чавунів з різною мікроструктурою для отримання якісного зміцненого шару; 2) дослідження факторів, що визначають твердість білого шару; 3) дослідження ступеня зміцнення чавунів з різною мікроструктурою в процесі фрикційного оброблення; 4) рекомендації з використання фрикційного оброблення.

Дослідження процесу фрикційного зміцнювального оброблення ВЧКГ

Колінчасті вали автотракторних двигунів здійснюють функцію перетворення зворотно-поступального руху поршнів в обертальний рух генератора. Колінчасті вали працюють за великих контактних напружень, за умови додаткових циклічних навантажень, а опорні шийки працюють в умовах тертя та інтенсивного зношування. Для забезпечення тривалої і надійної роботи двигуна колінчастий

вал повинен мати високий рівень експлуатаційних властивостей, який визначається структурою та властивостями поверхневого шару.

У процесі фрикційного зміцнення потік енергії створюється завдяки процесу високошвидкісного тертя зміцнювального інструмента-диска й оброблюваної деталі. Паралельно з процесом тертя з великою швидкістю відбувається зсувне деформування. У цьому випадку швидкість нагрівання може становити 60–90 м/с [8]. Протягом нетривалого часу поверхневі шари деталі нагріваються до температури вище ніж $A_{с3}$. Оскільки товщина нагрітого шару невелика, його охолодження відбувається з високими швидкостями внаслідок відведення тепла в глибину металу. Таке охолодження приблизно в 10^3 разів швидше, ніж за звичайного гартування. Водночас на поверхні формується білий шар – високодисперсний мартенсит, карбіди та залишковий аустеніт [7].

Дослідження впливу фрикційного оброблення на структуру та властивості поверхневого шару здійснювалось на зразках з високоміцного чавуну, які використовують для виготовлення колінчастих і розподільчих валів такого хімічного складу: 3,5 % С; 2,7 % Si; 0,005 % S; 0,7% Mn; 0,03 % P; 0,1 % Ni; 0,07 % Mg; 0,1 % Cr.

Чавунні циліндричні зразки, діаметром 60 мм, з отвором, діаметром 25 мм, виготовляли зі свідків, які отримували в процесі лиття. Як інструменти використовували фрикційний диск зі сталі 40Х, шириною 40 мм, зовнішню циліндричну поверхню якого шліфували до Ra 0,16–0,28. Краї профілю диска мають радіус 2 мм для покращення заходу та виходу диска в процесі зміцнення. Зразки розташовували на оправці, діаметром 25 мм, яку закріплювали в центрах модернізованого круглошліфувального верстата моделі ЗБ151.

Оскільки експлуатаційні властивості визначаються насамперед структурою металевої матриці, то зразки піддавали термічному обробленню – гартуванню з середнім і високим відпуском та нормалізації (табл. 1).

Результати фрикційного зміцнення залежать також від технологічних параметрів оброблення: глибини, подачі, колової швидкості, швидкості обертання деталі.

Параметри оброблення вибирали за рекомендаціями відповідно до технічних характеристик верстата: частота обертання деталі $n_d = 1,1$ об/с, колова швидкість диска $V_d =$

= 26,2 м/с, глибина оброблення $t = 0,3$ мм, швидкість поздовжньої подачі варіювали в інтервалі $S = 2-10$ мм/с. Поверхневе зміцнення здійснювали без змащення.

Таблиця 1 – Структура та властивості досліджуваного чавуну

Умовний номер чавуну	Стан чавуну	Структура чавуну	Твердість, HBW
1	Гартування за 860 °С, витримка 1 г, відпуск за 340 °С, витримка 2 г	Троостит відпуск + ферит + КГ	404–437
2	Гартування за 860 °С, витримка 1 г, відпуск за 550 °С, витримка 2 г	Сорбіт відпуск + ферит + КГ	295–321
3	Нормалізація з міжкритичного інтервалу: нагрівання до 860 °С, витримка 1,5 г, охолодження в струмені повітря	Перліт + феррит + КГ	250–305

Фрикційне зміцнення чавунних зразків здійснювали за допомогою диска з поздовжньою подачею (рис. 1).

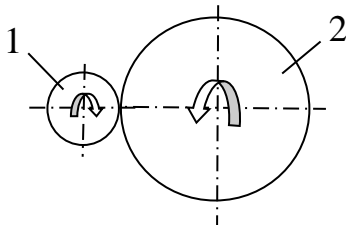


Рис. 1. Схема фрикційного оброблення: 1 – чавунний зразок, 2 – фрикційний диск

Після зміцнювального оброблення на зразках з різною структурою металевої матриці портативним вимірювачем шорсткості моделі TR200 визначали шорсткість обробленої поверхні, вимірювали мікротвердість та товщину зміцненого шару.

Дослідження продемонстрували, що мінімальна шорсткість Ra 0,5 мкм отримана за подачі $S = 6,0$ мм/с на чавуні після гартування та середнього відпуску (рис. 2). Цей чавун має найбільшу твердість.

Величина поздовжньої подачі 6 мм/с є оптимальним значенням.

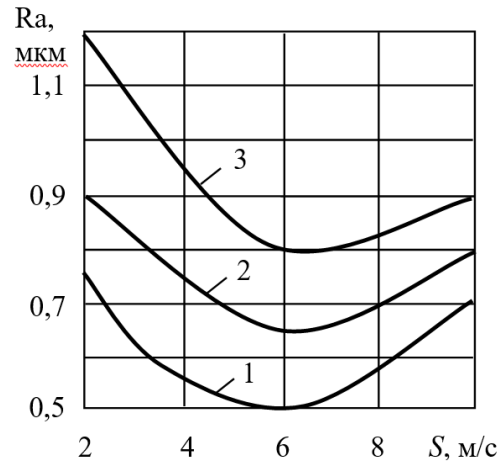


Рис. 2. Дослідження впливу поздовжньої подачі на шорсткість обробленої поверхні

Найбільша величина мікротвердості та товщина зміцненого шару отримана на зразках чавуну, які піддавали гартуванню та середньому відпуску (табл. 2).

Таблиця 2 – Характеристики основи та зміцненого шару на високоміцному чавуні

Характеристики зміцненого шару	Мікроструктура чавуну		
	Троостит відпуску + ферит + КГ	Сорбіт відпуску + ферит + КГ	Перліт + ферит + КГ
Мікротвердість основи, H_{50} , МПа	4800	3500	3100
Мікротвердість поверхневого шару, H_{50} , МПа	8050	7400	7200
Ступінь зміцнення, %	1,68	2,11	2,32
Товщина зміцненого шару, мкм	190	150	120
Підвищення мікротвердості білого шару у співвідношенні до загартованого чавуну, %	1,2	1,1	1,07

Найбільший ступінь зміцнення отриманий на чавуні з перліто-феритною металевою матрицею – 2,32 а, найменший – на чавуні з трооститною металевою матрицею – 1,68.

Щоб визначити відмінність властивостей білого шару після поверхневого гартування в процесі фрикційного оброблення, високоміцний чавун піддавали також об'ємному гар-

туванню та низькому відпуску з мікротвердістю $H_{50} = 6700$ МПа. Порівняльний аналіз мікротвердості чавуну після об'ємного гартування й низького відпуску та після фрикційного оброблення чавунів у різному вихідному стані демонструє, що твердість зміцненого білого шару більше, ніж твердість чавуну після об'ємного гартування. На твердість шару впливає вихідний стан чавуну – найбільша твердість білого шару спостерігається на чавуні, що має структуру трооститу відпуску, найменша – на чавуні із перліто-феритною структурою.

Фрикційне зміцнення може бути використане під час оброблення шийок колінчастих і розподільчих валів для отримання зносостійкого білого шару з низькою шорсткістю. Фрикційне оброблення може бути останньою технологічною операцією, яка складається одночасно зі зміцнювального оброблення та оздоблювального.

Висновки

1 визначена оптимальна величина поздовжньої подачі, що забезпечує високу якість зміцненого шару для чавунів з різною мікроструктурою: мінімальну шорсткість, максимальну твердість і глибину білого шару;

2 твердість білого шару, що отриманий у процесі фрикційного зміцнювального оброблення, залежить від його мікроструктури та параметрів. Максимальну твердість має білий шар, який отриманий з чавуну з трооститною мікроструктурою;

3 найбільший ступінь зміцнення щодо твердості вихідного стану має чавун з перліто-феритною мікроструктурою;

4 фрикційне зміцнення може бути використане для оброблення шийок колінчастих і розподільчих валів для отримання зносостійкого білого шару. Фрикційне оброблення є останньою технологічною операцією, яка поєднує зміцнювальне оброблення з оздоблювальним.

Література

1. 50th Census of World Casting Production. Modern Casting. 2016. December. P. 25–29.
2. Клименко С. І. Стан ливарного виробництва в Україні та перспективи його розвитку. *Ливарне виробництво*. 2008. № 5. С. 37–38.
3. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин [Текст]: навч. Посіб Фесенко А. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2015. 104 с.
4. Інженерія поверхні / Ющенко К. А. та ін. Київ: Наукова думка, 2007. 558 с.

5. Кирилів Я. Б. Визначення залишкових напружень після вібраційно-відцентрового зміцнення поверхонь деталей. *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького*. 2008. Том 10. № 3(38). Частина 3. С. 409–417.
6. Гурей Т. А. Підвищення зносостійкості чавунних деталей поверхневим зміцненням. *Вісник ХНАДУ*. 2016. Вип. 74. С. 48–52.
7. Волков О. О., Субботіна В. В., Федоренко Г. А. Розроблення технологічного комплексу для термофрикційного зміцнення виробів з круглим перерізом. *Вісник ХНАДУ*, 2021. Вип. 95. С. 65–72.
8. Гурей В. І. Моделювання амплітудно-частотної характеристики процесу фрикційного зміцнення плоских поверхонь деталей машин. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія «Динаміка і міцність» машин. 2020. № 2. С. 51–56.

References

1. 50th Census of World Casting Production. Modern Casting. 2016. December. P. 25–29.
2. Klymenko S. I. (2008). Stan lyvarnoho vyrobnytstva v Ukraini i perspektyvy yoho rozvytku. [The state of foundry production in Ukraine and prospects for its development]. *Lyvarne vyrobnytstvo*. N. 5. 37–38 (in Ukrainian).
3. *Metody poverkhnevoho zmitsnennia u protsesi vyhotovlennia detalei mashyn* / Fesenko A. H. et al. (2015) [Methods of surface hardening in the process of manufacturing machine parts]. Dnipropetrovsk: RVV DNU (in Ukrainian). 104 p.
4. *Inzheneriia poverkhni* [Surface engineering] / Yushchenko K. A. et al. (2007) Kyiv: Naukova dumka (in Ukrainian). 558 p.
5. Kyryliv Ya. B. (2008). Vyznachennia zalyshkovykh napruzhen pislia vibratsiino-vidtsentrovoho zmitsnennia poverkhon detalei [Determination of residual stresses after vibration-centrifugal strengthening of parts' surfaces]. *Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S. Z. Gzhytskoho*. Tom 10. № 3(38). Chastyna 3. 409–417 (in Ukrainian).
6. Hurei T. A. (2016). Pidvyshchennia znosostiikosti chavunnykh detalei poverkhnevym zmitsnenniam [Increasing the wear resistance of cast iron parts by surface hardening]. *Visnyk KhNADU*. Vyp. 74. Pp. 48–52 (in Ukrainian).
7. Volkov O. O., Subbotina V. V., Fedorenko H. A. (2021). Rozroblennia tekhnolohichnoho kompleksu dlia termofryktsiinoho zmitsnennia vyrobiv z kruhlym pererizom [Development of a technological complex for thermofriction hardening of products with a round cross-section]. *Visnyk KhNADU*. Vyp. 95. Pp. 65–72 (in Ukrainian).
8. Hurei V. I. (2020). Modeliuvannia amplitudno-chastotnoi kharakterystyky protsesu fryktsiinoho zmitsnennia ploskykh poverkhon detalei mashyn [Modeling of the amplitude-frequency

characteristics of the process of friction strengthening of flat surfaces of machine parts]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. «Dynamics and durability of cars»* No. 2. P. 51–56 (in Ukrainian).

Лалазарова Наталія Олексіївна¹, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. (+38) 095-390-38-16,

e-mail: lalaz1932@gmail.com,

Чигрин Анатолій Олександрович¹, асистент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. (+38) 067-991-08-13,

e-mail: Anatolijcigrin1@gmail.com,

Мачан Ігор Сергійович¹, студент,

тел. (+38) 095-810-79-99,

e-mail: machanigor@gmail.com,

Афанасьєва Ольга Валентинівна², к.т.н., доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, тел. (+38) 096-525-62-35, e-mail: 7584839@ukr.net,

Попова Олена Георгіївна³, к.т.н., доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, тел. (+38) 096-000-12-21, e-mail: o.popova@khai.edu,

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна,

²Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна,

³Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», вул. Чкалова, 17, м. Харків, 61070, Україна.

Friction strengthening of parts made of high-tension cast iron

Abstract. Problem. High-strength cast iron with nodular graphite is widely used in transport engineering instead of cast and forged steel in the manufacture of complex-shaped parts. The durability of parts largely depends on the quality of their surface layer. The quality of the surface layer is formed in the final operations of the manufacturing process. The problem of choosing a technological process that ensures the necessary quality of the surface layer of cast iron products, is sufficiently economical and simple to implement, does not require complex equipment and significant expenditure of energy resources is an urgent problem. Frictional hardening can be attributed to such a process. **Goal.** The purpose of the work is to study the features of frictional processing of high-strength cast iron with different microstructures to obtain a high-quality hardened layer. **Method.** Methods of measuring microhardness, thickness of the hardened layer, and roughness were used in the

work. **Results.** The paper investigated the effect of friction as a heat source of concentrated energy flow during friction hardening on the quality of the surface layer, which depends on the microstructure of cast iron and technological processing parameters. Among the technological parameters of processing, the longitudinal feed of the strengthening tool-disc has a significant influence. The optimal value of the longitudinal feed was determined, which ensures minimum roughness, maximum hardness and depth of the white layer for cast irons with different microstructures. **Scientific novelty.** The hardness of the white layer obtained as a result of friction hardening treatment depends on the initial microstructure and processing parameters. The white layer obtained on cast iron with a troostite microstructure has the maximum hardness. The greatest degree of hardening relative to the hardness of the original state of cast iron is characteristic of the pearlite-ferrite microstructure. **Practical significance.** Friction hardening can be used in the treatment of crankshafts and camshafts to obtain a wear-resistant white layer with low roughness. Friction treatment is the final technological operation, which combines strengthening treatment with finishing.

Key words: high-strength cast iron, friction hardening, microhardness, martensite, thickness of the hardened layer, white layer.

Lalazarova Nataliia¹, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, tel. (+38) 095-390-38-16,

e-mail: lalaz1932@gmail.com,

Chygrin Anatoliy¹, Assistant, Department of Technology of Metals and Materials Science,

tel. (+38) 067-991-08-13,

e-mail: Anatolijcigrin1@gmail.com,

Machan Igor¹, student, tel. (+38) 095-810-79-99,

e-mail: machanigor@gmail.com,

Afanasieva Olga², PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, tel. (+38) 096-525-62-35,

e-mail: 7584839@ukr.net,

Popova Olena³, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials, tel. (+38) 096-000-12-21,

e-mail: o.popova@khai.edu,

¹Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine,

14, Science Avenue, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 61166, Ukraine,

³Kharkiv National Aerospace University "KAI", 17, Chkalov str., Kharkiv, 61070, Ukraine.