

УДК 629.341

ЛОКАЛЬНЕ ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

Кандидати техн. наук Н. О. Лалазарова, Г. Л. Комарова, О. В. Афанасьєва, О. Г. Попова

LOCAL SURFACE STRENGTHENING OF HIGH-DUCTILE CAST IRON

PhD (Tech.) N. Lalazarova, PhD (Tech.) G. Komarova, PhD (Tech.), O. Afanasieva,
PhD (Tech.) O. Popova

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.211.2025.327124>



Анотація. У роботі подано метод підвищення зносостійкості поршневих кілець із високоміцного чавуну, який включає нормалізацію і поверхневе зміцнення. Порівняно режими зміцнення чавуну: об'ємне гартування, лазерне гартування з оплавленням, лазерне гартування УФ-випромінюванням. Показано ефективність поверхневого зміцнення високоміцного чавуну малопотужними УФ-лазерами за імпульсного режиму зі збереженням високої якості поверхневого шару.

Ключові слова: високоміцний чавун, лазерне гартування, випромінювання в УФ-діапазоні, зносостійкість.

Abstract. Piston rings work in extreme conditions of high temperatures, abrasive friction, high thermomechanical stress, oil starvation and aggressive environmental influences. The purpose of the work is to develop a method of increasing the wear resistance of piston rings made of high-strength cast iron due to the use of volumetric thermal annealing in combination with surface hardening by laser hardening with a low-power laser. The structure was studied using an optical microscope. Microhardness was measured on a PMT-3 microhardness tester. Wear is investigated using the roller-pad method on a friction machine. High-strength cast iron was subjected to normalization in order to ensure the required level of mechanical properties in cross-section. Laser technologies are used for surface strengthening of high-strength cast iron. A comparison of cast iron hardening regimes was carried out: volume hardening, laser hardening with melting, laser hardening with UV radiation. The study showed that cast iron has the highest hardness after quenching from the liquid state, less – after quenching with laser radiation in the UV range with a wavelength of $\lambda = 0.355 \mu\text{m}$, cast iron has the lowest hardness after bulk quenching. It was found that during laser hardening with UV radiation, the depth of the hardened layer depends on the initial microstructure, which is probably related to the different thermal conductivity of the microstructures. The pearlite-ferrite structure of cast iron after normalization has a higher thermal conductivity than the structure of martensite formed after volume hardening. For samples with a martensite structure, the energy of the laser beam provides heating to quenching temperatures at a greater depth. Hardening of high-strength cast iron with a UV laser ensures the formation of a finely dispersed martensite structure, increasing the hardness and wear resistance by 2 times while maintaining the quality of the surface layer.

Key words: high-strength cast iron, laser hardening, radiation in the UV range, wear resistance.

Вступ. Головний вузол двигуна внутрішнього згоряння – циліндропоршнева група (ЦПГ), функціонування якої визначає

ефективність роботи двигуна в цілому. Відповідальними деталями ЦПГ є поршневі кільця, які працюють в умовах тертя за

циклічних навантажень і підвищених температур і наявності абразивних частинок, корозійної дії хімічних сполук, що утворюються зі згорянням паливно-повітряної суміші [1].

Зважаючи на умови роботи кільця повинні мати такі властивості: низьке тертя, щоб уникнути суттєвих втрат потужності двигуна, високу зносостійкість і опір термомеханічній втомі, хімічним навантаженням і гарячій корозії. Поршневе кільце не має викликати надмірний знос циліндра, інакше значно скорочується термін служби двигуна, експлуатаційна надійність і витрати палива протягом усього часу експлуатації.

Залежно від функцій, які вони виконують, поршневі кільця поділяють на компресійні, маслоснімні і компресійно-маслоснімні. Компресійні поршневі кільця призначені для запобігання прориву газів між поршнем і стінками циліндра в картер. Прорив відпрацьованих газів, що мають високу температуру, між поршнем і стінкою циліндра може забезпечити зниження потужності, інтенсивне нагрівання деталей і припинення змащування. Усе це зменшує термін служби двигуна, знижує ефективність його роботи [2].

Через екстремальні умови функціонування поршневі кільця часто виходять із ладу, що може призвести до поломки всього двигуна. Тому підвищення зносостійкості поршневих кілець – один із ефективних способів забезпечення безвідмовної роботи ДВЗ.

Проблему підвищення зносостійкості поршневих кілець вирішують шляхом використання сучасних конструкційних матеріалів, технологій їх обробки та поверхневого зміцнення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для виготовлення поршневих кілець використовують різні конструкційні матеріали: сталь, бронзу, сірий чавун із пластинчастим графітом і високоміцний чавун із кулястим графітом (ВЧКГ).

Високоміцний чавун із кулястим графітом, що має високий рівень експлуатаційних властивостей, можна застосовувати для виготовлення поршневих кілець ДВЗ.

ВЧКГ має достатньо високий рівень міцності, твердості, ударної в'язкості та зносостійкості. Такий комплекс властивостей можна забезпечити модифікуванням, термічною обробкою і легуванням, різними методами поверхневого зміцнення [3, 4].

Проблема підвищення зносостійкості поршневих кілець пов'язана з їхньою конструкцією. Кільця мають невелику площину перерізу, що потребує використання методів, які не впливають на короблення виробу. Тому для підвищення зносостійкості необхідні технології з коротким часом дії високих температур або низькотемпературним хіміко-термічним впливом.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою є розроблення методу підвищення зносостійкості поршневих кілець із високоміцного чавуну за рахунок використання термічної обробки в поєднанні з поверхневим зміцненням – лазерним гартуванням малопотужними лазерами.

Для досягнення поставленої мети необхідно вивчити умови роботи поршневих кілець, особливості їхньої конструкції, структуру і властивості чавуну після об'ємної термічної обробки та поверхневого лазерного гартування.

Основна частина дослідження. Дослідження проводили на високоміцному чавуні хімічного складу: 3,3 – 3,8 % С; 2,4 – 3,2 % Si; $C + 1/3 Si = 4,25 - 4,35$ %; 0,004 – 0,007 % S; 0,5 – 0,9 % Mn; 0,045 – 0,008 % P; 0,05 – 0,1 % Cr; 0,1 – 0,15 % Ni; 0,04 – 0,09 % Mg. У структурі чавуну включення графіту глобулярної форми середнього розміру 30-60 мкм. Щільність графітних включень – 80-90 мм².

У литому стані мікроструктура чавуну являє собою перліт, ферит у вигляді

облямівки навкруги включень графіту і кулясті графітні включення.

Чавун у литому стані має високий ступінь неоднорідності як структурної, так і хімічної, спостерігають ліквідацію хімічних елементів, а саме кремнію. Усе це не дає змогу отримати високий рівень механічних властивостей (210-220 НВW, $\delta = 3\%$, КСУ = 15 Дж/см²). Для вивчення структури використовували оптичний мікроскоп. Мікротвердість досліджували на мікротвердомірі ПМТ-3.

Для забезпечення оптимального рівня механічних властивостей за перерізом високоміцний чавун піддавали нормалізації за таким режимом: нагрів до температури 860 °С, витримування за цієї температури протягом 1,5 години, охолодження в струмені повітря від вентилятора (275-285 НВW, $\delta = 3\%$, КСУ = 50 Дж/см²). Після нормалізації структура чавуну – дрібнодисперсна перліто-феритна (рис. 1). Чавун також піддавали об'ємному гартуванню за таким режимом: нагрів до температури 860 °С, витримування за цієї температури протягом 1,5 години, охолодження в оливі. Структура чавуну – мартенсит і залишковий аустеніт.

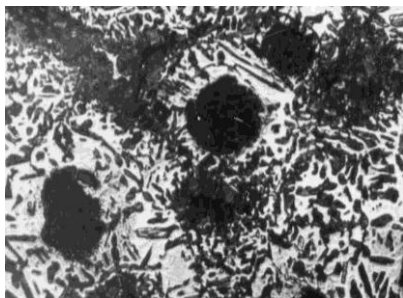


Рис. 1. Мікроструктура високоміцного чавуну після нормалізації, $\times 450$

Для поверхневого зміцнення виробів із високоміцного чавуну використовують лазерні технології. Лазерні промислові технології засновані на тепловій дії лазерного випромінювання на зміцнюваний

матеріал, при цьому на поверхні і в об'ємі матеріалу можуть розвиватися різні фізичні процеси [5]. За лазерного гартування необхідно забезпечити нагрів вище температури фазових перетворень, вище або нижче температури плавлення. Якщо гартування виконують із твердого стану, то в цьому випадку вдається зберегти геометричні і якісні характеристики поверхні.

Порівняли такі режими зміцнення: об'ємне гартування (1), гартування променем Nd:YVO₄-лазера потужністю 5 Вт із довжиною хвилі $\lambda = 1,06$ мкм (2), що працює в імпульсному режимі (обробка одиночними імпульсами), та гартування променем Nd:YVO₄-лазера з довжиною хвилі $\lambda = 0,355$ мкм (3), яка забезпечена за рахунок генерації третьої гармоніки. Малопотужні лазери раніше не застосовували для поверхневого зміцнення сталей і чавунів. У цьому випадку використання таких лазерів пояснено тим, що зміцнюють поверхневий шар малої площини.

У роботі [6] показано, що ІЧ-лазером із довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм не вдалося зміцнити без оплавлення поверхні. На рис. 2 наведений вигляд поверхні чавуну після лазерного гартування ІЧ-лазером.

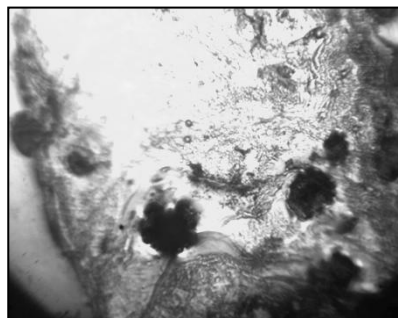


Рис. 2. Лазерне зміцнення високоміцного чавуну з оплавленням поверхневого шару

Мікротвердість поверхні, зміцненої гартуванням із рідкого стану, – $H_{100} = 9300$ -

9500 МПа. Середня мікротвердість чавуну після об'ємного гартування та відпуску – $H_{100} = 6300$ МПа. Мікротвердість чавуну після гартування випромінюванням в УФ-діапазоні – 8000 МПа (рис. 3).

Мікротвердість зразків після гартування УФ-випромінюванням нижче, ніж із рідкого стану, проте набагато вище, ніж після об'ємної термічної обробки.

Це свідчить про ефективність лазерного гартування УФ-випромінюванням. Якість поверхневого шару після лазерного гартування УФ-випромінюванням не змінюється, на відміну від гартування з рідкого стану (з оплавленням). Така поверхня потребує чистової обробки після лазерного гартування.

Дослідження мікроструктури зразків із високоміцного чавуну за допомогою електронного мікроскопа показали, що мартенсит, який утворюється з гартуванням УФ-випромінюванням, має більш дисперсну структуру, ніж після об'ємного гартування (рис. 4).

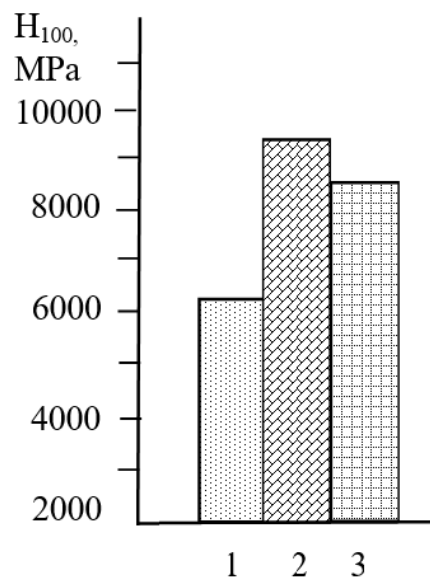
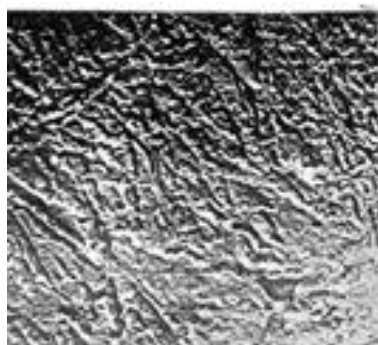
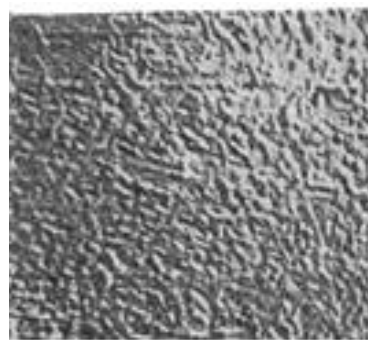


Рис. 3. Мікротвердість чавуну після різних видів гартування:

1 – об'ємне гартування; 2 – лазерне гартування з оплавленням; 3 – лазерне гартування УФ-випромінюванням



а



б

Рис. 4. Мікроструктура ВЧКГ після об'ємного гартування (а); лазерного гартування УФ-випромінюванням (б), $\times 10000$

Можна припустити, що оптимізація режимів гартування УФ-випромінюванням може забезпечити отримання поверхневих наноструктур.

Товщина зміцненого УФ-випромінюванням шару на нормалізованому чавуні складає 0,1-0,15 мм. Розподіл мікротвердості за глибиною наведений на рис. 5.

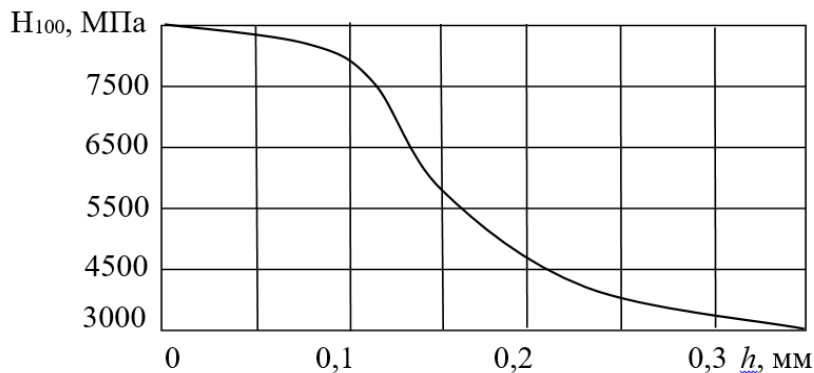


Рис. 5. Розподіл мікротвердості шару, зміцненого лазерним гартуванням УФ-випромінюванням за глибиною

У роботі досліджено вплив вихідної мікроструктури чавуну на характеристики загартованого шару. Встановлено, що за лазерного гартування УФ-випромінюванням глибина зміцненого шару досить сильно залежить від вихідної мікроструктури чавуну, що пов'язано, імовірно, з різною теплопровідністю мікроструктур. Перліто-феритна структура

чавуну після нормалізації має більшу теплопровідність, ніж структура мартенситу, що утворюється після об'ємного гартування.

Для зразків із структурою мартенситу енергія лазерного променя забезпечує нагрівання до гартівних температур на більшу глибину (глибина зміцненого шару 0,15-0,2 мм) (рис. 6).

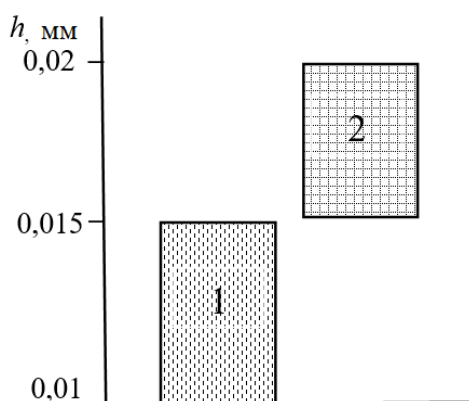


Рис. 6. Вплив вихідної мікроструктури на глибину зміцненого шару: 1 – ВЧКГ після нормалізації; 2 – ВЧКГ після об'ємного гартування

А з обробкою зразка з перліто-феритною структурою енергія випромінювання розсіюється вглиб матеріалу за рахунок більшої теплопровідності (глибина зміцненого шару 0,1-0,15 мм).

Тобто для отримання більш глибокого зміцненого шару лазерну обробку високоміцних чавунів можна проводити на готових деталях, що пройшли попереднє об'ємне гартування. Така обробка дасть

зможу отримати структуру із меншою теплопровідністю.

Об'ємна термічна обробка високоміцного чавуну і лазерне гартування УФ-випромінюванням забезпечують суттєве збільшення твердості і зносостійкості поверхневого шару.

Для підтвердження ефективності запропонованих зміцнювальних технологій проведені зносні випробування. Порівнювали зносостійкість високоміцного чавуну в нормалізованому стані, після об'ємного гартування, після нормалізації та лазерного гартування УФ-випромінюванням. Зразки, які загартовували лазерною обробкою з рідкого стану, не випробували

на зносостійкість, оскільки якість їхнього поверхневого шару незадовільна.

Випробування на тертя і зношування проводили за схемою «ролик-колодка» на машині тертя СМЦ-2. Пару тертя для високоміцного чавуну після термічної обробки і поверхневого зміцнення складав чавун СЧ20, з якого виготовляють гільзу циліндрів. Величину зносу контртіл – ролика і колодки – визначали ваговим методом із точністю до 0,1 міліграма на електронних вагах. Кожне випробування проводили протягом 10 годин і повторювали два рази.

Результати зносних випробувань наведені в таблиці.

Таблиця

Результати випробувань на зносостійкість

Стан чавуну і вид обробки	Знос, мг
1. ВЧКГ після нормалізації	0,0064
2. ВЧКГ після об'ємного гартування	0,004
3. ВЧКГ після нормалізації та лазерного гартування УФ-випромінюванням	0,003

Аналіз зносних випробувань показав, що найкращі результати отримано після нормалізації та лазерного гартування УФ-випромінюванням. У цьому випадку спостерігають суттєве зниження зносу – більш ніж у два рази відносно ВЧКГ після нормалізації.

Отже, комбінована обробка, яка складається з нормалізації і лазерного гартування УФ-випромінюванням, може бути рекомендована для підвищення зносостійкості поршневих кілець із високоміцного чавуну зі збереженням високої якості поверхневого шару.

Висновки. На основі виконаних досліджень можна зробити висновок про можливість поверхневого зміцнення високоміцного чавуну малопотужними УФ-лазерами за імпульсного режиму.

Лазерне гартування УФ-випромінюванням підвищує твердість і зносостійкість чавуну і не змінює якість поверхні виробу, на відміну від лазерного гартування з рідкого стану. Оскільки продуктивність такого процесу низька, це дає змогу рекомендувати використання цього виду обробки для локального зміцнення деталей або інструменту.

Встановлено, що попередня зміцнювальна об'ємна термічна обробка – гартування – дає змогу отримати більш глибокий зміцнений шар після лазерного зміцнення порівняно з чавуном після нормалізації через різницю в теплопровідності перліто-феритної і мартенситної структур.

Список використаних джерел

1. Andrzej Wolff, Grzegorz Koszałka. Influence of engine load on piston ring pack operation of an automotive IC engine. *Combustion Engine*, s. 2022. 190(3). 88-94. DOI: <https://doi.org/10.19206/CE-141737>.
2. Semih Genculu P. E. Cast Irons: Properties and Applications. URL: https://www.cabww.com/uploads/case_studies/CastIronProp-wp.pdf.
3. Research and Analysis of the Effect of Heat Treatment on Damping Properties of Ductile Iron / Zhang, Yu, Guo, Erjun, Wang, Liping, Feng, Yicheng, Zhao, Sicong and Song, Meihui. *Open Physics*. 2019. Vol. 17. No. 1. P. 566-574.
4. Laser Remelting of Ductile Cast Iron to Achieve a Graphite-Free Surface Layer for Enabling a Manual High-Gloss Finish / Laura Kreinest, Johannes Schüssler, Onur Özaydin, Sujith Kochuthundil Subhash, Edgar Willenborg and Andreas Bührig-Polaczek. *Metals*. 2024. 14. 347. P. 1-14. <https://doi.org/10.3390/met14030347>.
5. Lewin Rathmann, Tim Radel. Influence of laser hardening on laser induced periodic surface structures on steel substrates. 2021. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1135 012024.
6. New Technologies of Laser Hardening of Parts of Fuel Equipment / O. S. Hnatenko, O. V. Afanasieva, N. O. Lalazarova, Yu. S. Kurskoy, E. N. Odarenko, Y. V. Sashkova, O. V. Ivanchenko. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2023. Vol. 15. No 1. P. 1-7. [https://doi.org/10.21272/jnep.15\(1\).01007](https://doi.org/10.21272/jnep.15(1).01007).

Лалазарова Наталія Олексіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, Харківський національний автомобільно-дорожній університет. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Тел.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Комарова Ганна Леонідівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції, Український державний університет залізничного транспорту. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Тел.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Афанасьева Ольга Валентинівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Тел.: +38 (096) 525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Попова Олена Георгіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри композитних конструкцій та авіаційного матеріалознавства, Харківський національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Тел.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: o.popova@khai.edu.

Lalazarova Nataliia, PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, Kharkiv National Automobile and Highway University. <https://orcid.org/0000-0002-2138-9081>. Tel.: +38 (095) 390-38-16. E-mail: lalaz1932@gmail.com.

Komarova Hanna, PhD, Associate Professor, department of wagon engineering and product quality, Ukrainian State University of Railway Transport. <https://orcid.org/0000-0001-8597-58-91>. Tel.: +38 (067) 999-85-77. E-mail: anna.kom3793@gmail.com.

Afanasieva Olga, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, National University of Radio Electronics. <https://orcid.org/0000-0002-5382-2986>. Tel.: +38(096)-525-62-35. E-mail: 7584839@ukr.net.

Popova Olena, PhD, Associate Professor, Department of Composite Structures and Aviation Materials, Kharkiv National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute». <https://orcid.org/0000-0003-3955-3852+38>. Tel.: +38 (067) 570-12-17. E-mail: o.popova@khai.edu/.

Статтю прийнято 03.03.2025 р.