

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/02>

**Ковальчук Ю.О.**

Уманський національний університет садівництва

**Пушка О.С.**

Уманський національний університет садівництва

**Войтік А.В.**

Уманський національний університет садівництва

**Ковальчук А.О.**

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

**Садовий К.В.**

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

### ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМОВОГО МЕТОДУ ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ІЗ ЧАВУНУ

Наводяться результати розробки лазерно-плазмового методу для зміцнення поверхні металів. Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду. Розряд запалюється повторюваними з високою частотою слідування (десятки кілогерц) лазерними імпульсами в фокусі променя CO<sub>2</sub> лазера. Для утворення плазми в обробній головці створюється високошвидкісний потік газу: аргону, азоту, кисню. Потік плазмоутворюючого газу в плазмохімічній камері має швидкість до 500 м/с і тиск до 0,5 МПа.

Порівняння питомої продуктивності лазерно-плазмової обробки чавуну СЧ25 з традиційним лазерним гартуванням безперервним випромінюванням показало, що продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7-10 разів вища, ніж у традиційного лазерного гартування. Це пояснюється 4-5-кратним зростанням ефективності енергообміну між лазерною плазмою і металом порівняно із прямим поглинанням лазерного випромінювання, а також дією гіперінтенсивного ультразвуку.

Для підвищення зносостійкості сірого чавуну в парах тертя методом лазерної обробки створена структура з високотвердим (12-20 ГПа) наноструктурованим поверхневим шаром товщиною до 1 мкм, який прилягає до шару товщиною близько 100 мкм з локально загартованими навколо графітових включень ділянками. Отримана структура поверхні забезпечує зниження коефіцієнта тертя на 30% і 20-кратне збільшення зносостійкості в умовах рідинного тертя. Це зумовлено створенням мікрорельєфу пар тертя, що включає капілярні канали, які акумулюють мастило по місцях розташування графіту, і тверді складники – ледебурит і мартенсит, які оточують ці мікроканавки.

Для перевірки впливу твердих фаз, отриманих при лазерно-плазмовій обробці чавуну, на властивості міцності проведені випробування на статичний згин і ударну в'язкість. Отримані результати не показують помітного зниження міцності на згин і ударної в'язкості сірого чавуну після застосування лазерно-плазмового методу обробки.

**Ключові слова:** лазерна плазма, оптичний пульсуючий розряд, гартування, мікротвердість, зносостійкість.

**Постановка проблеми.** Серед виробників сільськогосподарської техніки особливою актуальності набуло питання покращення механічних властивостей і збільшення ресурсу виробітку деталей двигунів внутрішнього зго-

рання, багато з яких виготовляються із чавуну. Перед ними стоїть задача забезпечення високих експлуатаційних характеристик тих деталей, які найбільше піддаються зносу та виходять із ладу.

Одним із можливих методів зміцнення деталей двигунів внутрішнього згоряння є лазерно-плазмова обробка, яка поки що майже не застосовується виробниками. Для ефективного застосування цього методу модифікації поверхонь металевих виробів необхідно враховувати внутрішні процеси в поверхневому шарі зміцнюваних зразків, які відбуваються внаслідок впливу лазерно-плазмового струменю, а також залежність властивостей зміцнюваного зразка від заданих параметрів лазерно-плазмової обробки.

Правильний підбір параметрів процесу зміцнення під час застосування лазерно-плазмового методу (далі – ЛПМ) забезпечуватиме значно вищі показники міцності та зносостійкості оброблюваних зразків, ніж можуть забезпечити інші методи. Тому системне дослідження особливостей впливу лазерно-плазмового струменю на зміцнювану поверхню матеріалу на тепер є актуальним і важливим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішення задач, пов'язаних із визначенням властивостей сталей, які зазнають впливу лазерно-плазмового струменю, привертає увагу багатьох науковців і вчених. Цим питанням вчені почали займатися ще за радянських часів (Н.Н. Рикалін та А.А. Углов) [1]. В наш час цими питаннями займалися С.Н. Багаєв, Г.Н. Грачов, А.Л. Смирнов та інші, які вивчали вплив лазерно-плазмового потоку на поверхню зразків у різних випадках та для різних сплавів [2–3].

Існуючі дослідження впливу параметрів процесу лазерно-плазмової обробки поверхні залізо-вуглецевих сплавів, з яких виготовляють деталі сільськогосподарських машин, здебільшого охоплюють обмежене коло випадків, тому отримані дані потребують подальшої систематизації та узагальнення.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення впливу лазерно-плазмової обробки на властивості чавуну, аналіз особливостей формування мікроструктури у відповідних зразках, визначення залежності глибини та мікротвердості зміцнюваної зони від різних параметрів цього процесу, дослідження зносостійкості та інших механічних властивостей оброблених лазерно-плазмовим методом зразків із чавуну.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду (далі – ОПР), який запалюється повторюваними з високою частотою слідування (десятки кілогерц) лазерними імпульсами в фокусі променю

CO<sub>2</sub>-лазера в швидкісних потоках газів із домішками реагуючих компонентів на поверхні оброблюваного матеріалу. Експериментальними і теоретичними методами визначено, що плазма ОПР для ініціації хімічних реакцій має унікальне поєднання властивостей, недоступних для існуючих способів (індукційний надвисокочастотний нагрів НВЧ, тліючий, дуговий і безперервний оптичний розряди, піроліз, горіння):

- рекордною (для плазмохімічних методів) питомою потужністю енерговиділення в обсязі газової фази до 5 ГВт/см<sup>3</sup>;
- можливістю отримання локально рівноважної (час обміну ~ 10 нс) плазми при тиску 1 атм. і більше;
- високою температурою і концентрацією (10<sup>18</sup>-10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>) частинок;
- високим рівнем ультрафіолетового радіаційного обміну, сприятливого для дисоціації, іонізації, збудження частинок;
- швидким (за мікросекунди) охолодженням плазми ОПР, що забезпечує контрольоване гомогенне утворення частинок без забруднень, зменшення їх розміру, пригнічення росту, отримання не тільки наночастинок, а й нанокластерів.

Поряд із фізико-хімічними перевагами ЛПМ необхідно зазначити й загальні переваги для розробки промислових нанотехнологій:

- процес може проводитися при тиску газу в зоні реакції більше атмосферного, що часто дозволяє виключити з технологій дорогі вакуумні системи, відмовитися від робочої камери і проводити обробку великогабаритних виробів складної конфігурації автоматизованими маніпуляторами за заданою програмою;
- ефективний обмін енергією між лазерною плазмою і металом забезпечує 7-10-кратне збільшення продуктивності ЛПМ порівняно з традиційним лазерним гартуванням і 3-4-кратне – для технологій наплавлення, легування;
- високі робочі тиски забезпечують осадження нанокластерів покриттів зі швидкостями синтезу на 2-3 порядки більшими, ніж у відомих методах плазмохімічного осаження з газової фази;
- метод дозволяє використовувати широкий спектр вихідних компонентів (гази, аерозолі, пари) і вибирати з них найбільш прийнятні для промислової реалізації технології;

– широкі діапазони управління характеристиками імпульсно-періодичного

випромінювання, швидкістю потоку (0-500 м/с), сортом і складом буферного або робочого газу (Ar, He, Ne, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) забезпечують можливості широкого пошуку і оптимізації за ефективністю варіанта технології;

– можливість проведення спрямованого синтезу наноматеріалів із

використанням вихідних компонентів у вигляді стехіометричної суміші аерозолів (в тому числі тугоплавких), що значно спрощує і здешевлює завдання підбору вихідних реагентів.

Основою лазерно-плазмової технологічної установки, що визначає її технологічні можливості, є імпульсно-періодична CO<sub>2</sub>-лазерна система генератор-підсилювач середньою потужністю до 2 кВт і імпульсною потужністю близько сотні кіловат з можливістю управління частотою слідування (до 120 кГц) і тривалістю лазерних імпульсів. Оригінальна оптична схема системи генератор-підсилювач дозволяє формувати промінь із плоским фронтом, плавним розподілом інтенсивності і якістю, близькою до дифракційної межі, усунути ефекти самозбудження системи «лазер-метал» поблизу фокуса, які призводять до спотворення форми імпульсу (зниження імпульсної потужності), а також розподілу інтенсивності і в результаті до нестабільності лазерно-плазмової обробки.

Лазерний промінь поворотними дзеркалами, розташованими на рухомих порталах і каретці програмно-керованого двокоординатного столу, направляється на лінзу лазерно-плазмової обробної головки і фокусується на осі газового потоку з домішками реагуючих компонентів. Таке технічне рішення дозволяє проводити лазерно-плазмову обробку безпосередньо в атмосфері і тільки необхідних заданих областей виробу.

Існуючі лазерно-плазмові технологічні установки забезпечують широкі діапазони можливостей лазерно-плазмової обробки за інтенсивністю променя (до 2-3 ГВт/см<sup>2</sup>), за швидкістю потоку (до 500 м/с) і тиском газу в плазмоімичній камері (до 0,5 МПа) для модифікації поверхні металів із приповерхневою плазмою. При лазерно-плазмовій модифікації поверхні металів повторювані з високою частотою слідування лазерні імпульси, сфокусовані на поверхні металу рухомого зразка, запалюють плазму оптичного пульсуючого розряду в потоці робочого легуючого газу (наприклад, азоту при нітридації) (Рис. 1) [2].

Набір осцилограм, отриманий під час проведення ЛПМ-обробки, дозволяє визначити, коли

і при якій потужності випромінювання настає перевищення інтенсивності над порогом запалювання і виникає лазерна плазма, а також динаміку й ефективність поглинання лазерного випромінювання утворюваною плазмою (Рис. 2) [3].

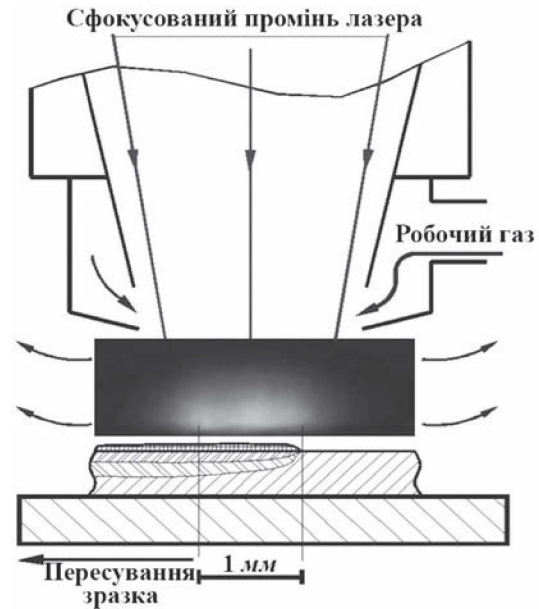


Рис. 1. Схема лазерно-плазмової обробки металу із зображенням приповерхневої плазми оптичного пульсуючого розряду

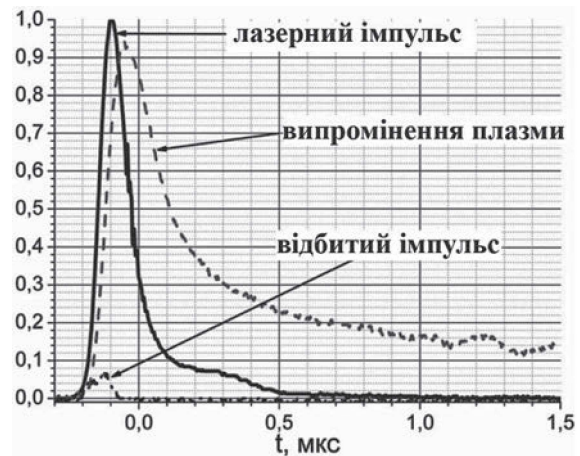


Рис. 2. Осцилограми лазерного імпульсу, випромінювання плазми та відбитого імпульсу від металу лазерного імпульсу

Залежно від частоти проходження лазерних імпульсів, розміру плями опромінювання і відносної швидкості переміщення променя та деталі цикл обробки може включати десятки-сотні впливів лазерної плазми на кожну ділянку поверхні. Здебільшого тривалість циклу обробки в умовах інтенсивного впливу променя і лазерної плазми (десятки МВт/см<sup>2</sup>) обмежена розплавленням поверхневого шару, що перевищує допуски на



шорсткість оброблюваної поверхні. Для досягнення більшої рівномірності і поліпшення технологічних характеристик виробу, наприклад твердості і глибини зони лазерно-плазмової модифікації (Рис. 3), замість одного циклу обробки можливе проведення декількох повторюваних циклів із більшою швидкістю і меншою кількістю енергії [3].

Необхідно зазначити, що періодична (20-100 кГц) дія лазерної плазми на поверхню металу в легуючій атмосфері одночасно формує:

- високотверде наноструктуроване твердофазне покриття (нітриди, карбіди);
- хвилю дифузії, утворення легованого шару або твердого розчину (наприклад, твердий розчин азоту в титані);
- теплову хвилю і структурно-фазові (наприклад, мартенситні) перетворення;
- гіперінтенсивний ультразвук (амплітуда до 10-15 МПа), що сприяє ущільненню мікроструктури в гарячій зоні.

Детальне дослідження можливостей методу проведено для лазерно-плазмової модифікації поверхні антифрикційного чавуну на перлітній основі

(з метою визначення перспектив застосування ЛПМ для зміцнення гільз циліндрів двигунів внутрішнього згоряння) на зразках, вирізаних із циліндричних втулок двигунів внутрішнього згоряння.

У всіх досліджених зразках спостерігалася модифікація поверхні з утворенням двох шарів. Верхній наноструктурований шар товщиною сотні нанометрів набував мікротвердості в діапазоні 12-15 ГПа (Рис. 3а) за рахунок насичення азотом і утворенню тонкої мікроструктури. До верхнього наноструктурованого шару прилягав шар, який мав ділянки зі структурою ледебуриту (гартування з рідкого стану) і мартенситу (гартування з твердого стану). Причому фазові перетворення з плавленням металу розпочиналися внаслідок концентраційної неоднорідності розподілу вуглецю за фазами сплаву закономірно навколо графітових включень. В цьому шарі (між поверхневим шаром і основою металу) відбувалися структурні перетворення, характерні для лазерного гартування, які призводять до збільшення мікротвердості до рівня 8-10 ГПа (в 3-4 рази твердіше основи) на товщині в десятки-сотні мікрометрів (Рис. 3а).

Порівняння питомої продуктивності лазерно-плазмової обробки чавуну СЧ25 із традиційним

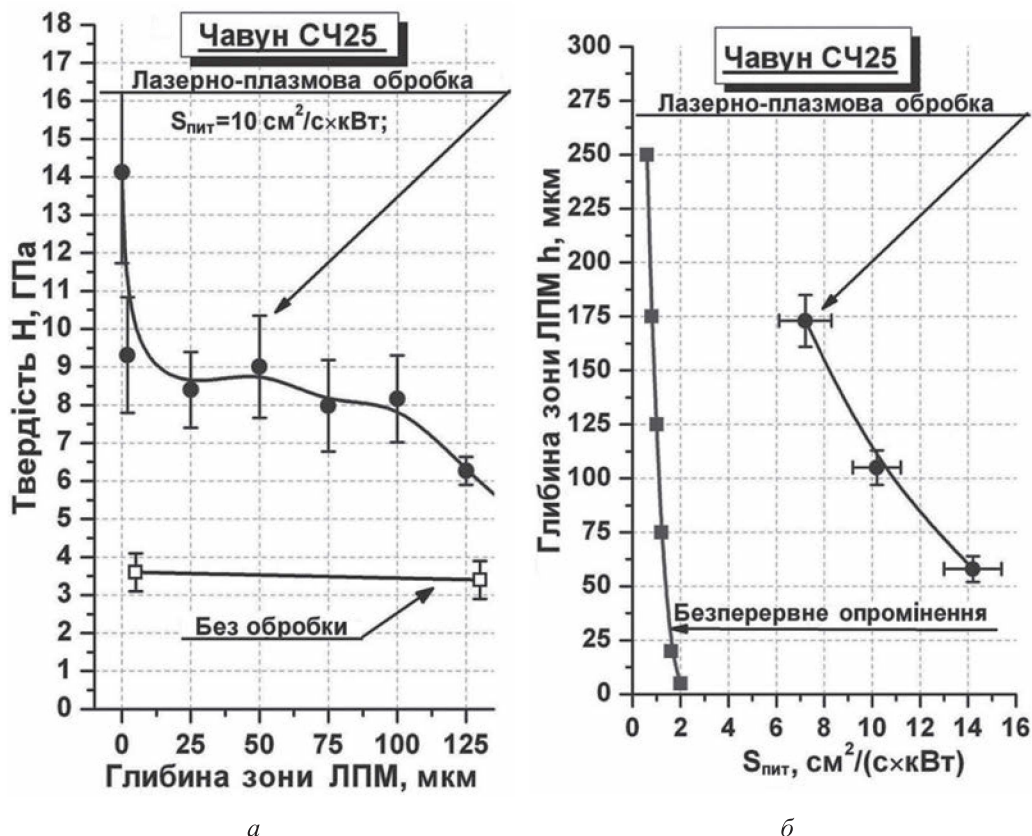


Рис. 3. Мікротвердість (а) та глибина зони (б) лазерно-плазмової модифікації поверхні чавуну СЧ25 залежно від питомої (на 1 кВт потужності лазера) швидкості обробки

лазерним гартуванням безперервним випромінюванням показало, що продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7-10 разів вище, ніж у традиційного лазерного гартування (Рис. 3б). Це пояснюється 4-5-кратним зростанням ефективності енергообміну між лазерною плазмою і металом порівняно із прямим поглинанням лазерного випромінювання, а також дією гіперінтенсивного ультразвуку.

Оцінка триботехнічних властивостей проводилася при випробуванні зразків після попереднього взаємного притирання поверхонь диска (загартована сталь 40) і колодки (зразок, вирізаний із циліндричної втулки двигуна). Питоме навантаження в умовах рідинного тертя при змашуванні маслом становило 1250 МПа. Результати випробувань представлені на Рис. 4 [2]. Оброблені лазером зразки зношувалися в прийнятих умовах випробувань зі швидкістю в 20 разів меншою порівняно зі швидкістю зношування вихідних (без ЛПМ моди-

фікації) зразків. При цьому на третину зменшився коефіцієнт тертя.

У підповерхневих шарах графітові пластини оточені шарами металу зі структурою, отриманою загартуванням з рідкого (ледебурит) і твердого (двійниковий мартенсит) стану. Ці тверді ділянки сприймають зусилля, що виникає в парі тертя, забезпечуючи зносостійкість чавуну. Крім того, вони перешкоджають затиранню графітових частинок, зберігаючи мастилоутримуючий рельєф поверхні і забезпечуючи низький коефіцієнт тертя.

Для перевірки впливу твердих фаз, отриманих при ЛПМ обробці чавуну, були проведені випробування на статичний згин  $\sigma_s$  і ударну в'язкість  $a_u$ . Отримані результати (Табл. 1) не показують помітного зниження міцності на згин і ударної в'язкості сірого чавуну після ЛПМ. Тому цей метод показує кращі показники, ніж звичайне лазерне зміцнення [4].

Таблиця 1

Вплив лазерно-плазмової обробки на механічні властивості сірого антифрикційного чавуну на перлітній основі

Стан матеріалу	Питома швидкість зношування $V_{zn} \cdot 10^{-7}$ , г/год	Коефіцієнт тертя $f$	Статичний згин $\sigma_s$ , МПа	Ударна в'язкість $a_u$ , КДж/м <sup>2</sup>
СЧ25 без обробки	142	0,0059	400-420	85-90
СЧ25 після ЛПМ	6	0,0035	420-430	80-85

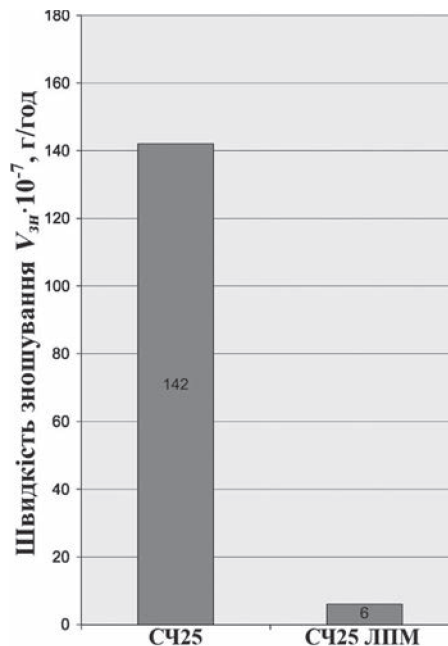
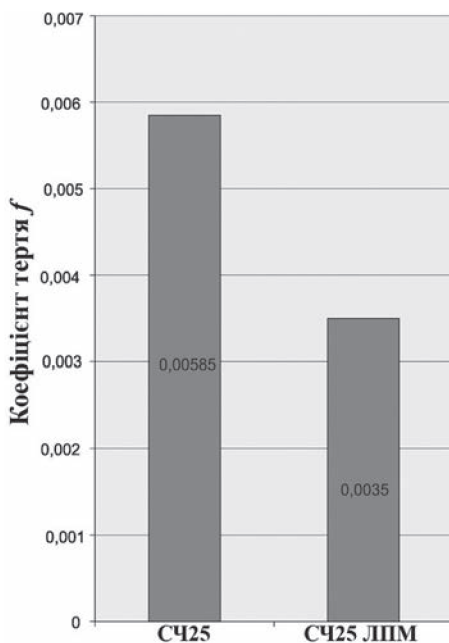


Рис. 4. Вплив лазерно-плазмової обробки на коефіцієнт тертя (а) та швидкість зношування (б) зразків із сірого чавуну в парі тертя «сталевий диск – чавунна колодка»

**Висновки.** Шляхом застосування лазерно-плазмового методу була виконана високопродуктивна модифікація поверхні сірого чавуну, на якій сформована унікальна композитна структура, що складається з високотвердого поверхневого шару з мікротвердістю 12-20 ГПа і загартованого під-

шару з мікротвердістю 8-10 ГПа товщиною в десятки-сотні мікрон. Випробування на зразках із сірого чавуну на перлітній основі марки СЧ25 показало, що така композитна структура може багаторазово збільшити зносостійкість відповідних деталей, які визначають ресурс техніки.

#### Список літератури:

1. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерно-плазменная обработка металлов при высоких давлениях газов. *Квантовая электроника*. 1981. Т. 8. № 6. С. 1193–1201.
2. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Смирнов А.Л., Хомяков М.Н., Токарев А.О., Смирнов П.Ю. Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания. *Обработка металлов*. 2014. № 1 (62). С. 14–23.
3. Багаев С.Н., Грачёв Г.Н., Смирнов А.Л., Хомяков М.Н., Токарев А.О. Модификация поверхности серого чугуна методом лазерно-плазменной обработки. *Актуальные проблемы в машиностроении* : материалы Первой междунар. науч.-практ. конф. (Новосибирск, 26 марта 2014 года). Новосибирск, 2014. С. 229–235.
4. Ковальчук Ю.О., Дідур В.В., Кравченко В.В. Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»*. 2012. Вип. 25. Ч. 1. С. 74–80.

**Kovalchuk Yu.O., Pushka O.S., Voitik A.V., Kovalchuk A.O., Sadovyi K.V.**

#### **APPLICATION OF LASER-PLASMA HARDENING METHOD OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES PARTS FROM CAST IRON**

*The results of the development of a laser-plasma method for hardening the surface of metals are presented. The laser-plasma method is based on the use of plasma optical pulsating discharge. The discharge is ignited by laser pulses repeated at a high repetition rate (tens of kilohertz) at the focus of the CO<sub>2</sub> laser beam. For plasma formation in the processing head, a high-speed gas stream is created: argon, nitrogen, oxygen. The plasma-forming gas flow in the plasma-chemical chamber has a velocity of up to 500 m/s and a pressure of up to 0.5 MPa.*

*Comparison of the specific productivity of laser-plasma processing of SCh25 cast iron with traditional laser hardening by continuous radiation showed that the productivity of laser-plasma processing is 7-10 times higher than that of traditional laser hardening. This is explained by a 4-5-fold increase in the energy exchange efficiency between the laser plasma and the metal, compared with direct absorption of laser radiation, as well as the action of hyperintensive ultrasound.*

*To increase the wear resistance of gray cast iron in friction pairs by laser processing, a structure with a high-hard (12-20 GPa) nanostructured surface layer up to 1 μm thick adjacent to a layer about 100 μm thick with sections locally quenched around graphite inclusions is created. The resulting surface structure provides a decrease in the coefficient of friction by 30% and a twenty-fold increase in wear resistance under conditions of liquid friction. This is due to the creation of a microrelief of friction pairs, including capillary channels that accumulate lubricant at the locations of graphite, and the solid components – ledeburite and martensite surrounding these microgrooves.*

*To test the effect of solid phases obtained by laser-plasma processing of cast iron on the strength properties, tests were carried out for static bending and impact strength. The results do not show a noticeable decrease in bending strength and toughness of gray cast iron after the application of the laser-plasma processing method.*

**Key words:** laser plasma, optical pulsating discharge, hardening, microhardness, wear resistance.