УДК:621.785.53
О.Г.Чернети, к.т.н., **І.О. Бабка, Є.В.Чалдишева**
Дніпродзержинський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СПОСОБІВ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

Запропоновано методику лазерної обробки і дослідження технологічних процесів комбінованої лазерної обробки і обробки СВЧ у середовищі азотовміщуючих речовин, досліджені мікроструктури поверхневого шару деталей двигуна, які представляють собою рейковий (пакетний, голчатий) мартенсит з високим рівнем мікро напружень, з мікро двійниками, зони карбонітридів і зони нітридів.

Ключові слова: *лазерна обробка, технологічні процеси, зносостійкість, фізіко-механічні та експлуатаційні властивості, структура*

Предложена методика лазерной обработки и исследования технологических процессов комбинированной лазерной обработки и обработки СВЧ в среде азотовместительных веществ, исследованы микроструктуры поверхностного слоя деталей двигателя, которые представляют собой рельсовый (пакетный, игольчатый) мартенсит с высоким уровнем микро напряжений, с микро двойниками, зоны карбонитридов и зоны нитридов.

Ключевые слова: *лазерная обработка, технологические процессы, износостойкость, физико-механические и эксплуатационные свойства, структура*

The methodology of the work is founded on an establishment of the formation behavior of physical-and mechanical as well as service properties of wear-resistant surfaces at all stages of manufacturing method of laser treatment. The influence of technological parameters of laser treatment on structure and properties of the formed layers for four classes of materials as applied to compact materials and oxyfuel gas coatings alike has been investigated. The relationships involving the technological parameters of the process with the structure features as well as physical-and mechanical and service properties of the materials have been obtained. The effect of an initial state of workpieces on efficiency of laser treatment process has been determined. The influence behavior of spatial-and temporal characteristics of laser beam are established on the basis of heat make for laser treatment process and experimental data of qualitative parameters of formed layers.

Keywords: *laser treatment, technological properties, wear resistance, physical-and mechanical and service properties, structure.*

Постановка проблеми. Дослідження процесів зношування у трибоконтактуючих парах двигунів внутрішнього згорання і закономірностей впливу лазерної обробки робочих поверхонь у середовищі азотовміщуючих речовин на ступінь зношування газорозподільного і кривошипно-шатунного механізмів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автомобіль є складною системою, яка є сукупністю постійно діючих елементів, збірних одиниць і деталей, що забезпечують його функціювання. Сучасний автомобіль складається з 15-20 тис. деталей, де 7-9 тис. деталей втрачають свої первинні властивості в процесі роботи, а 3-4 тис. деталей мають термін служби менше ніж автомобіль в цілому.

За даними Науково-дослідного центру безпеки дорожнього руху (НДЦБДР) України автомобільний парк країни, що збільшується щороку на 8%, складається зараз з 7,8 млн. автомобілів.

З них 6,5 млн. – легкові автомобілі, причому 3,5 млн. з них машини радянського виробництва, середній вік яких складає більше 18 років. Середній вік всього легкового парку автомобілів складає близько 13 років.

Всього в країні за даними ДАЇ експлуатується більше 500 тис. вантажних автомобілів всіх класів вантажопідйомності.

За даними компанії «Кредит-Рейтинг», з 1995 по 2009 р.р. легковий автопарк в країні збільшився майже удвічі. Залежно від вікового чинника автопарк України за станом на 2009 р. на 21% представлений автомобілями випуску 1981-1985 років, на 25% – 1986-1990 років, 16% – 1991-1995 років, по 1% – 1996 і 1997 року, по 2% – 1998-го і після 1998 року. Вік більше ніж половини всіх автомобілів перевищує 14 років. Згідно оцінки українських експертів за станом на початок 2009 р. в Україні експлуатувалося близько 150-170 тис. автобусів всіх класів, з яких близько 90% – це машини, вік яких перевищує 10 років.

Співвідношення зареєстрованих в Україні автомобілів складає 19% іномарок до 81% - автомобілів країн СНД. Але співвідношення автопарку легкових автомобілів, що реально діє в Україні наступне: 35-45% автомобілів виробництва країн СНД, інші – іноземного виробництва.

В даний час цілий ряд транспортних засобів в різних галузях промисловості мають дуже обмежений термін служби, що приводить до величезних збитків. Матеріальні втрати в результаті тертя і зношування в машинобудуванні розвинених держав досягають 4-5% національного доходу. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машин іноді у декілька разів перевищують їх вартість. Ресурс двигунів після ремонту порівняно з ресурсом нового двигуна складає 30-50%, хоча ресурс за технічними умовами повинен бути не меньше 80%. Найбільшому спрацюванню підлягають деталі двигуна та деталі ходової частини автомобіля. За характером руху при роботі трибоконтактуючих пар значну частину складають деталі, що постійно знаходяться в обертанні (колінчастий вал, розподільні вали, підшипники ковзання та кочення, зубчасті зчеплення і т. інше), здійснюють циклічні пересування (зворотно-поступовий рух) або сприймають їх вплив – поршневі кільця, клапани, поршні, гільзи, а також деталі, що здійснюють складні комбіновані переміщення.

Метою роботи є підвищення зносостійкості деталей газорозподільного і кривошипно-шатунного механізмів двигунів внутрішнього згорання шляхом розробки технології комбінованої лазерної обробки попередньо азотованих робочих поверхонь.

Результати дослідження. Домінуючий вплив на зношення деталей надають сили тиску газу, які при зворотно-поступальному, циклічному, прискореному й уповільненому рухах деталей сприяють зростанню місцевих деформацій на поверхні контактуючих пар і нерівномірності зносу поверхонь деталей через притиснення до торців деталей під дією сили тиску газів, інерції і тертя. Причому навантаження істотно змінюється у більшу сторону при жорсткості умов експлуатації двигуна внутрішнього згорання.

На інтенсивність зношування головним чином впливає навантаження зони контакту, що пропорційне тиску і шляху тертя. Навантаження зони тертя, у якій зношування матеріалів є наслідком пітінгу, впливає на інтенсивність зношування.

Руйнування при пітінгу полягає в утворенні дрібних тріщин і у наступному відшаровуванні матеріалу з типово утомленим характером. Збільшення навантаження зони тертя може бути викликано зовнішнім навантаженням або динамічною дією мас циліндропоршневої групи. При фретінгі знос залежить від навантаження.

При навантажені вузлів циліндропоршневої групи в зоні контакту крім пружних деформацій мають місце і пластичні деформації. Пластична деформація верхніх шарів тертьових пар поверхонь деталей характеризується неоднорідністю, що, з одного боку обумовлюється різною висотою і формою нерівностей поверхні контакту, а з іншого боку, наявністю високих температур і умов протікання пластичної деформації. При пластичних деформаціях різного роду мікро -, макро - і субмікрооб'ємів у зоні тертя виникає велика кількість різноманітних структурних дефектів: вакансій, атомів у між вузлах, дислокацій. При терті ковзанням в процесі пластичної деформації металу частина дислокації виходить на поверхню деталі, утворюючи на ній активні центри. Крім того, необхідно враховувати пружні деформації решітки, з якими зв'язані зміни електронної щільності.

Динамічні і швидкісні режими навантаження пар тертя у значній мірі впливають на характер зносу, що обумовлено ростом температур і погіршенням умов змащення, осушенням поверхні контакту. При експлуатації ДВЗ при різних швидкісних режимах [1] контактуючі пари можуть втрачати пружність під дією циклічних, динамічних процесів і руху в опорах. При форсованому русі автомобіля інтенсивність зношування циліндропоршневої групи дорівнює 0,15 мкм на 1000 км пробігу автомобіля, а в умовах інтенсивного міського руху − 1..2,0 мкм. В особливо тяжких умовах інтенсивність зношування циліндропоршневої групи досягає 5 мкм на 1000 км пробігу автомобіля в результаті сумарних швидкісних і динамічних навантажень.

На інтенсивність зношування крім навантаження впливає відносна швидкість переміщення пар тертя у зоні контакту, що є головною характеристикою з усього спектра впливу. При попаданні абразиву в зону контакту деталей при малих швидкостях інтенсивного зношування не відбувається. Однак при перевищенні відносної швидкості деяких граничних значень швидкостей виникають лавинні процеси різання, дряпання, що призводить до катастрофічного зносу. При експлуатації ДВЗ у зоні контакту тертьових пар протікають наступні основні процеси: схоплювання, мікро зварювання й окислювання. Причому схоплювання на поверхні тертя спостерігається при швидкості 0,0025-0,5 м/с з утворенням поглиблень, наростів і подряпин при значній зміні шорсткості. При відносній швидкості 0,5-1 м/с знос у зонах контакту викликається процесами окислювання, а при швидкості 1-5 м/с − процесом руйнування зони контакту (мікро зварювання), що характеризується інтенсивним зношуванням металу із зніманням матеріалу паралельно напряму відносного руху. Процес мікро

зварювання спостерігається при температурах від 400 до 1100°С [2] і приводить до структурних змін металу поверхневих шарів і утворенню вторинних структур з мікротвердістю під поверхневих зон.

Використання комбінованих технологій для отримання заданих фізико-механічних характеристик в поверхневому шарі деталі після її азотації, лазерної поверхневої обробки (ЛПО), обробки струмами високої частоти (СВЧ) є пріоритетним напрямом у сучасному виробництві створення зміцнюючих покриттів робочих поверхонь деталей. В останніх випадках структурно-фазові перетворення здійснюються у твердому стані. Ці види обробки використовують для сплавів, що мають поліморфні перетворення. Перевагами цієї обробки є збереження мікрогеометрії поверхні деталі, що дає змогу уникнути операцій її механічної обробки.

Лазерна поверхнева обробка [3], обробка СВЧ відрізняються від термообробки тим, що вони можуть здійснюватися як з оплавленням, так і без оплавлення поверхні деталі. В останньому випадку структурно-фазові перетворення здійснюються у твердому стані. Цей вид обробки використовують для сплавів, що мають поліморфні перетворення. Перевагами цієї обробки є збереження мікрогеометрії поверхні деталі, що дає змогу уникнути операцій її механічної обробки.

При загартованості з оплавленням поверхні деталі, спостерігається суттєве погіршення вихідної мікрогеометрії поверхні.

ЛПО має наступні переваги перед іншими способами термообробки [3]:

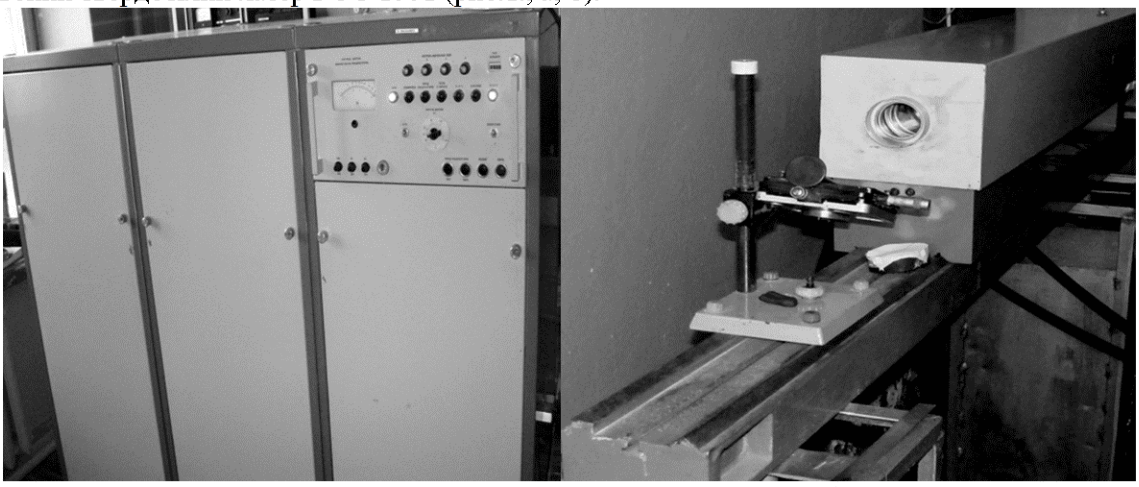
- можливість зміцнення поверхні деталі любої форми та важкодоступних місць у деталях складної конфігурації;
- локальність нагріву (малі зони термічного впливу), що дає змогу усунути деформації деталі;
- безконтактність впливу випромінювання, що дозволяє зміцнити любі матеріали незалежно від їх фізико-механічних властивостей;
- висока продуктивність та економічність термічної обробки поверхонь деталей автомобілів і т. ін.

На підставі вивчення роботи поверхневих шарів пари «колінчастий вал-вкладиш», «клапан-сідло клапана» представляється наступна модель механізму взаємодії трибологічних сполучень:

- створення первинних плівок, що виникають при адсорбції матеріалів змащення;
- створення вторинних граничних плівок, що виникають із продуктів взаємодії первинних тертьових пар (окисли заліза, атомарний водень, сульфіди і т. ін.);
- формування серфінг-плівки (шар Білбі) - як результату складного фізико-хімічного сполучення;
- створення шару окислів і їхніх сполучень;
- створення текстурованої зони;
- створення зони пластичних деформацій;
- створення зони пружних деформацій.

Чітку границю між первинними і вторинними граничними шарами та модифікованим шаром поверхні деталі провести неможливо, тому що вони перебувають в стані динамічної рівноваги. Відбувається постійний обмін іонами, масопереніс, що супроводжується постійними окисними і термоокислювальними процесами.

Для термообробки робочої поверхні клапанів двигунів внутрішнього згорання використовуємо імпульсний твердотілий лазер ГОС 1001 (рис.1., а, б).



а б

Рисунок 1 – Твердотільний лазер ГОС 1001. а – пульт керування лазером; б – лазер

Лазерну обробку проводили в лазерному пучку, що розходиться, оскільки це дозволяє забезпечити оптимальні показники якості зміцнення робочих поверхонь деталей.

До характеристик зміцненої області відносяться геометричні розміри зони лазерної дії, мікротвердість і шорсткість поверхні деталі. При накладенні одиничної плями геометричні розміри зони лазерної дії виражаються її глибиною *h* і шириною *b* (рис.2).

При зміцненні робочої поверхні деталі з оплавленням, тобто при $E > E_{кр}$, відбувається зміна шорсткості поверхні деталі. Найбільший вплив на неї надає щільність потужності випромінювання, при збільшенні якої шорсткість поверхні деталі зростає. Це відбувається із-за гідродинамічних ефектів в розплаві, зміни об'єму при фазових переходах і часткового випаровування матеріалу.

Критична щільність потужності $E_{кр}$ є важливим параметром імпульсного лазерного зміцнення поверхні деталі. На неї робить вплив ряд чинників. Із збільшенням ступеня легованості сталей критична щільність потужності лазерної обробки зменшується, що приводить до зменшення глибини зони лазерної дії при зміцненні без оплавлення. Це обумовлено тим, що із збільшенням змісту легуючих елементів температура солідусу і теплопровідність матеріалу зменшується. Тому для оплавлення поверхні деталі потрібно менше енергії, тобто $E_{кр}$ знижується [4].

Лазерне зміцнення проводили на імпульсному твердотілому лазері ГОС 1001.

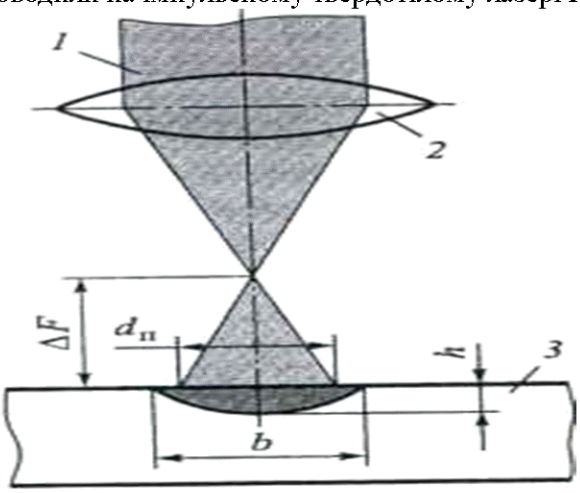


Рисунок 2. – Схема лазерної обробки. 1 – промінь лазера; 2 – лінза; 3 – деталь

Для зміцнення робочих поверхонь клапанів двигунів внутрішнього згорання використали наступний режим:

Відстань від лінзи лазеру до поверхні клапана – 270 мм;

Діаметр плями отриманої після пострілу лазеру – 2 ÷ 3 мм;

Енергія накачування конденсаторів лазеру – 13÷14 кДж (2,3-2,4 кВ).

Для досліджень вибрана сталь 40Х10С2М, з якої виготовляють впускні клапани двигунів внутрішнього згорання автомобілів.

Шліфи зразків для металографічного аналізу, вирізані з різних ділянок подовжніх перетинів клапанів з вказаної сталі, заливали пастою «Протокріл» у спеціальні обойми, а потім оброблювали шліфовкою і поліровкою по стандартній схемі [4]. Травлення полірованих шліфів здійснювали в стандартному травильнику (реактив Ржешотарського – 4% розчин HNO_3 у спирті – «ніталь» [4]).

Металографічний аналіз отриманих шліфів проводили за допомогою сучасних мікроскопів фірми «Карл Цейсс»: оптичного мікроскопа «Axiovert 200M MAT» і растрового електронного мікроскопа EVO 60

Початкова структура мікрошліфа – феритно-карбідна (рис.3)

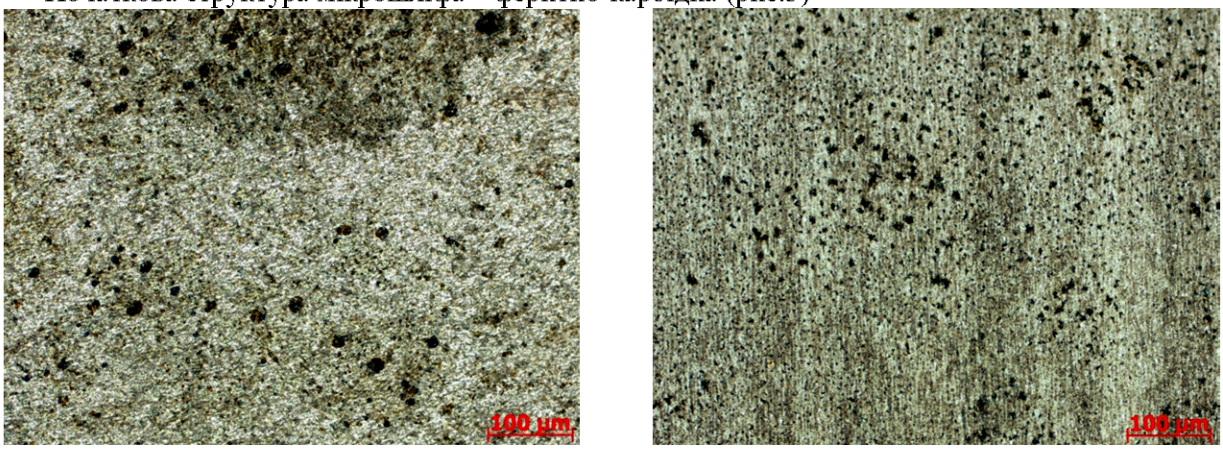
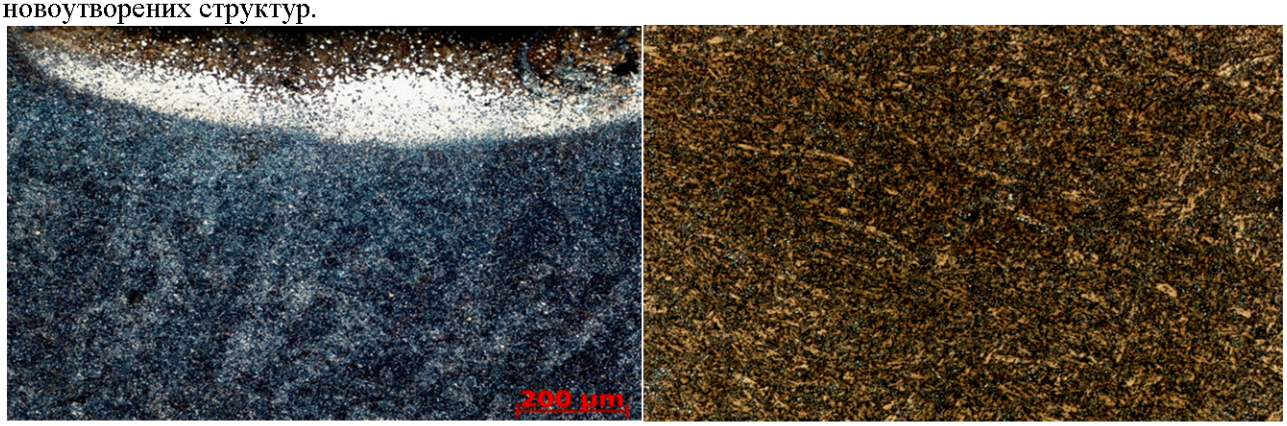


Рисунок 3 – Мікроструктура зразка клапана з сталі 40Х10С2М. а – початкова; б – нормалізована

Мікроструктура серцевини сталі 40Х10С2М азотованого зразка в торцевій частині на значному видаленні від поверхні (рис.4а.) є феритом з дисперсними вкрапленнями цементиту. При мікроаналізі на поверхні і в при поверхневій зоні азотованих зразків спостерігаються протяжні шари світлої складової з прожилками, що розповсюджуються в глиб зразків (рис.4). Рентгенодіфрактометричний аналіз типової робочої поверхні азотованих зразків свідчать про те, що інтенсивність інтерференції (110) α – Fe (фериту), найінтенсивнішою в дифракційному спектрі чистого заліза, в азотованому зразку виражена слабо. Розшифровку дифрактограм зразків, отриманих на рентгенівському дифрактометрі ДРОН–2.0 в мідному монохромотизованому випромінюванні, проводили шляхом порівняння відносних інтенсивностей і значень розрахунків міжплощинних відстаней з результатами досліджень, представлених в ASTM Card File. Дані рентгеноструктурного аналізу не виявили ніяких новоутворених структур.



а. б.

Рисунок 4 Мікроструктура сталі 40Х10С2М (а. – після азотування і б. – лазерною обробкою)

Лазерна обробка, що характеризується малим часом нагріву і охолоджування, високими температурними градієнтами, нестаціонарною протікаючих процесів приводить до істотних змін в структурі оброблюваних матеріалів і дозволяє істотно покращити їх службові характеристики Лазерне зміцнення проводили на імпульсному твердотілому лазері ГОС 1001. Для дослідження була вибрана хромиста сталь мартенситного класу 40Х10С2М, яку використовують для виробництва впускних клапанів двигунів внутрішнього згорання [5].

Фотографія мікроструктури надповерхневого шару зразка клапана (сталь 40Х10С2М) після імпульсної лазерної термообробки представлена на рис.5.

Після дії на зразок клапана імпульсним лазерним променем на його робочій поверхні утворюється зміцнена ділянка сегментної форми [6]. Ширина обробленої зони – близько 1000 мкм, максимальна глибина проникнення – 390 мкм.

Рисунок 5 – Мікроструктура надповерхневого шару(сталь 40Х10С2М) після лазерної термообробки, х800

При зміцнені з оплавленням будова зони лазерної дії неоднорідна по глибині і складається з двох шарів. Перший шар кристалізується з рідкого стану і має структуру мартенситу із залишковим аустенітом. Для другого шару характерна структура дрібнозернистого фериту.

Для визначення твердості металів застосовують метод втискування. На втискуванні сталевої кульки засновані прилади Брінеля і Польді. На втискуванні алмазного конуса і сталевої кульки - прилад Роквелла. Чим менше при певному навантаженні проникає в метал кулька або алмазний

конус, тим метал твердіший. Знаючи твердість, можна судити про показники міцності і пластичності металу [7].

Метод визначення мікротвердості призначається для визначення твердості дуже малих мікроскопічних об'ємів матеріалу. Головне його призначення - оцінка твердості окремих фаз або структурних складових сплаву, а також різниці в твердості різних ділянок цих складових.

Дюрометричні випробування проводили за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 шляхом втискування індентора під навантаженням P = 20, 30 і 100 г. В якості індентора при вимірюванні мікротвердості використовували правильну чотиригранну алмазну піраміду з кутом при вершині між протилежними гранями рівним 136°.

Мікротвердість (рис.6) в зоні термічного впливу практично однакова і складає 5650МПа. Проте в окремих областях оплавленої зони мікротвердість досягає величини 7790МПа, тобто вона неоднорідна.

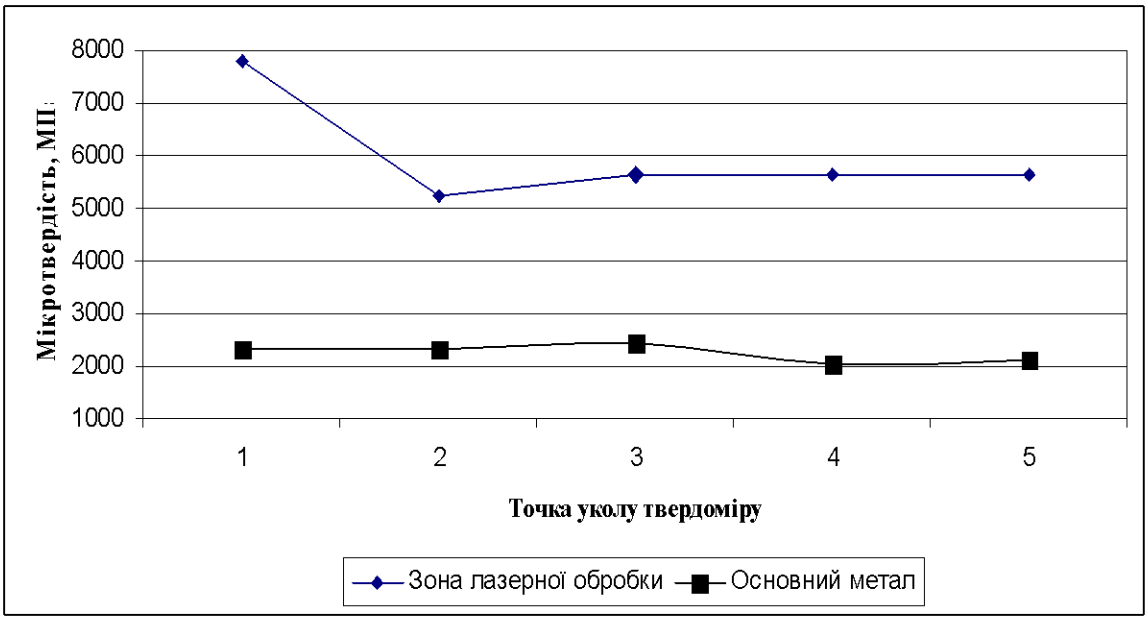


Рисунок 6 –Мікротвердості $H_{\mu 0,5}$ на сталі 40Х10С2М різних зонах після лазерної обробки

Висновки. В результаті лазерної обробки утворюються зносостійкі покриття, які в своєму складі мають мартенситні утворення (пакетний, рійковий, голчастий мартенсит), карбонітриди і нітриди з мікротвердістю, при товщині, яка дорівнює 70…80 мкм.

Інформаційні джерела

1. Хрущов М.М. Повышение износостойкости деталей двигателя внутреннего сгорания. Москва. Машиностроение,1977. − С.3-16.

2. Григорьев М.А., Пономарев Н.Н. Износ и долговечность автомобильных деталей. − М.: Машиностроение , 1976. − С.102-113.

3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов / Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – с. 286 -293, 327.

4. Баранова Л.В., Демкина Э.Л. Металлографическое травление металлов. Справочник. – М.: Металлургия, 1986 – 256 с.

5.Поддубный И.Н. Определение износостойкости клапанов двигателей внутреннего сгорания / И.Н. Поддубный, О.Г. Чернета, С.А. Сачевичик // Сборник научных трудов КГМТУ «Механизация прозводственных процессов рыбного хозяйства, промышленных и аграрных предприятий». – 2009. – Вып.10. – С. 170 – 173.

6. Исследование структуры клапанов двигателей внутреннего сгорания, подвергнутых закалке токами высокой частоты / О.Г. Чернета, А.М. Нестеренко, И.Н. Поддубный [и др.] // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту. – 2009. – №1(8), – С.87 – 89.

7.Исследование структуры стали 40Х10С2М, подвергнутой термоупрочнению / О.Г. Чернета, А.М. Нестеренко, И.Н. Поддубный [и др.] // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2009. – Вип. 38. – С.239 – 242.