

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31 DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.54-60>

**Ю.О. Ковальчук**, доц., канд. техн. наук, **І.О. Лісовий**, доц., канд. техн. наук  
*Уманський національний університет садівництва, м. Умань, Україна*  
*e-mail: temp14053@gmail.com*

## Лазерно-плазмове зміцнення попередньо термооброблених деталей автомобільного транспорту в АПК

Наведено результати лазерно-плазмового впливу на структуру та мікротвердість поверхонь звичайної та після термічної обробки гартуванням з низьким та високим відпуском конструкційної сталі 40ХН з різною структурою. В результаті виявлено, що лазерно-плазмова обробка дозволяє проводити зміцнення поверхні даної сталі до високої твердості 9–11 ГПа на глибину близько 0,2 мм. Застосування лазерно-плазмової обробки для зміцнення поверхні можливе на різних етапах технологічного процесу виготовлення або ремонту деталей автомобільного транспорту в АПК.

**лазерна плазма, оптичний пульсуючий розряд, гартування, мікротвердість, деталі автомобільного транспорту в АПК**

**Постановка проблеми.** Нині лазерні технології широко використовуються у різних сферах життя людини. Наприклад, їх ефективно застосовують у розвідці [1].

Використання можливостей впливу лазерного випромінювання є актуальним також і в галузі сільського господарства, зокрема для зміцнення різних деталей автомобільного транспорту.

Одним із найбільш ефективних методів зміцнення деталей різних машин є лазерно-плазмова обробка (ЛПО).

Виготовлення та ремонт деталей автомобільного транспорту в АПК із застосуванням лазерно-плазмового зміцнення, як і для лазерного гартування, передбачає застосування високоенергетичного впливу на поверхню сталевих виробів на різних етапах технологічного процесу: при зміцненні поверхні нормалізованої або відпаленої сталі безпосередньо після механічної обробки, а також після об'ємної термічної обробки з різними видами відпуску на різну твердість, що визначається призначенням оброблюваних деталей.

У зв'язку з цим актуальним є вивчення впливу вихідної структури оброблюваної сталі на результат лазерно-плазмової обробки, зокрема на мікротвердість за глибиною зміцнених зразків.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вирішення задач, пов'язаних з визначенням властивостей залізобуглецевих сплавів, що зазнають впливу лазерного випромінювання, привертало увагу багатьох науковців та вчених в їх працях [2–8].

Питанням лазерно-плазмової обробки металевих зразків вчені почали займатись ще за радянських часів, зокрема Н.Н. Рикалін та А.А. Углов. Вперше термохімічна дія плазми пробою була продемонстрована ними у відповідній роботі [9].

Так само подібна технологія із застосуванням різних типів лазерів (ХеСl, КrF, Nd:YAG) з низькою частотою проходження імпульсів ( $\leq 100$  Гц) описана в роботах [10, 11].

Застосування імпульсно-періодичного CO<sub>2</sub>-лазера виявляється доцільним внаслідок низької межі пробою газу і можливості забезпечення високої продуктивності процесу обробки за рахунок високої частоти повторення імпульсів (до 120 кГц).

В останні роки формується та удосконалюється високопродуктивний лазерно-плазмовий метод зміцнення поверхні сталей та сплавів [12–14], він суттєво перевершує традиційні методи лазерного гартування безперервним та імпульсно-періодичним лазерним випромінюванням.

Цей метод зараз є найбільш перспективним для зміцнення металевих виробів та потребує подальшого дослідження.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначення лазерно-плазмового впливу на структуру та мікротвердість поверхонь звичайної та після термічної обробки гартуванням з низьким та високим відпуском конструкційної сталі 40ХН з різною структурою, аналіз процесу формування мікроструктури у розглянутих зразках, дослідження можливості застосування лазерно-плазмової обробки для зміцнення поверхні на різних етапах технологічного процесу виготовлення або ремонту деталей автомобільного транспорту в АПК.

**Виклад основного матеріалу.** Лазерно-плазмовий метод заснований на застосуванні плазми оптичного пульсуючого розряду. Розряд запалюється повторюваними з високою частотою проходження (десятки кГц) імпульсами  $\text{CO}_2$ -лазера, сфокусованими на оброблюваній поверхні в потоці лежучого газу. Потік плазмоутворюючого газу (азоту, вуглекислоти, повітря) створюється в обробній головці співвісно лазерному випромінюванню (рис. 1).

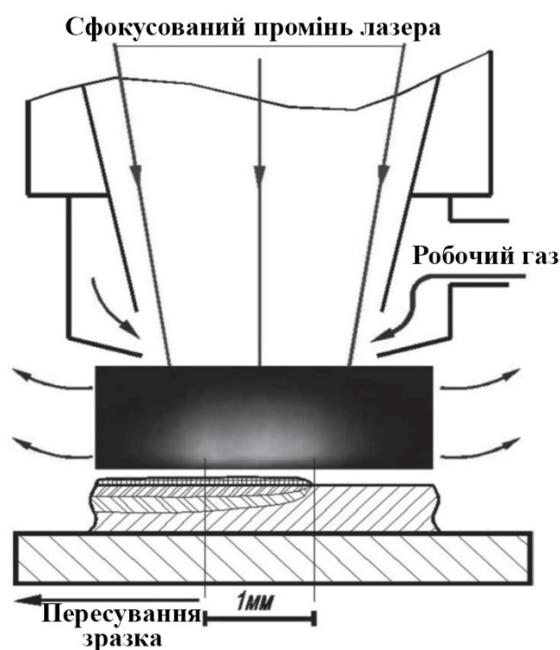


Рисунок 1 – Схема обробки матеріалів на лазерно-плазмовій технологічній установці із зображенням приповерхневої лазерної плазми

Джерело: [12]

Для проведення лазерно-плазмової обробки використовувалась лазерно-плазмова технологічна установка [14]. Основою установки, що визначає її технологічні можливості, є імпульсно-періодична  $\text{CO}_2$ -лазерна система генератор-підсилювач середньою потужністю до 2 кВт та імпульсною потужністю сотні кВт з можливістю керування частотою (до 120 кГц) та тривалістю лазерних імпульсів.

Залежно від частоти лазерних імпульсів, розміру плями опромінення та відносної швидкості переміщення променя та деталі цикл обробки включає десятки/сотні впливів лазерної плазми на поверхню. Ефективний обмін енергією високої концентрації між лазерною плазмою і металом забезпечує швидкість локального нагріву, що сягає  $10^5$ – $10^7$  градусів в секунду, при цьому продуктивність лазерно-плазмової обробки в 7–10 разів вища порівняно з традиційним лазерним гартуванням [12].

Було вибрано наступні режими лазерно-плазмового впливу: енергія лазерного імпульсу становила близько 15 МДж при частоті імпульсів 60 кГц. Випромінювання фокусувалося в пляму діаметром 0,8 мм, тривалість піку лазерних імпульсів на піввисоті становила 0,2 мкс, таким чином пікова інтенсивність імпульсу сягала  $14 \text{ МВт/см}^2$ .

У якості робочого газу використовувався азот, тиск якого у форкамері складав 2 атм. Швидкість лінійного переміщення зразків становила 20 мм/с. Обробка здійснювалась зі скануванням фокусу лазерного випромінювання у напрямку, перпендикулярному лінійному переміщенню зразків, частота та амплітуда сканування становили 300 Гц та 3 мм відповідно.

Матеріалом дослідження слугувала низьколегована якісна конструкційна сталь 40ХН у звичайному стані та після термічної обробки гартуванням з низьким та високим відпуском.

Для дослідження твердості за глибиною зони лазерно-плазмового впливу використовувався мікротвердомір ПМТ-3 при навантаженні на індентор 20 г.

В результаті ЛПО отримано зміцнені лазером смужки на сталях з вихідною мікроструктурою, характерною для різних етапів технологічного процесу виготовлення та ремонту деталей машин.

Структурні перетворення в сталі при ЛПО визначаються градієнтом температур. Глибина загартованих шарів та структура зон термічного лазерно-плазмового впливу залежать від вихідної структури та параметрів лазерно-плазмової обробки, але при цьому мають місце загальні закономірності.

Розглянемо спочатку особливості мікроструктури та твердості сталі з *ферито-перлітною* структурою при лазерно-плазмовій обробці [14].

Найбільш висока температура, що викликає плавлення та випаровування матеріалу, при лазерній обробці виникає на поверхні оброблюваних виробів. При подальшому охолодженні за рахунок інтенсивного тепловідведення в холодну серцевину металу в зоні плавлення відбувається загартування з рідкого стану та утворення мартенситу з мікротвердістю 11–13 ГПа. До цих ділянок прилягає зона мартенситу з твердістю 6–7 ГПа, отриманого загартуванням при охолодженні з твердого аустенітного стану.

У зоні, в якій при нагріванні відбувається неповне фазове перетворення, утворення мартенситу починається за межами перлітних ділянок.

Розподіл структурних складових за перерізом зони лазерно-плазмового впливу та їх твердість наведено на рис. 2. Загальна глибина зміцненого шару становить 0,2 мм [8].

Далі було розглянуто вплив лазерно-плазмової обробки на особливості мікроструктури та твердості сталі зі структурою *сорбіту відпуску* [14].

У процесі структурних перетворень завдяки однорідності вихідної структури сорбіту відпуску зона фазових перетворень визначається головним чином температурою нагрівання. Внаслідок цього між загартованою мартенситною зоною та зоною термічного впливу спостерігається чітка межа.

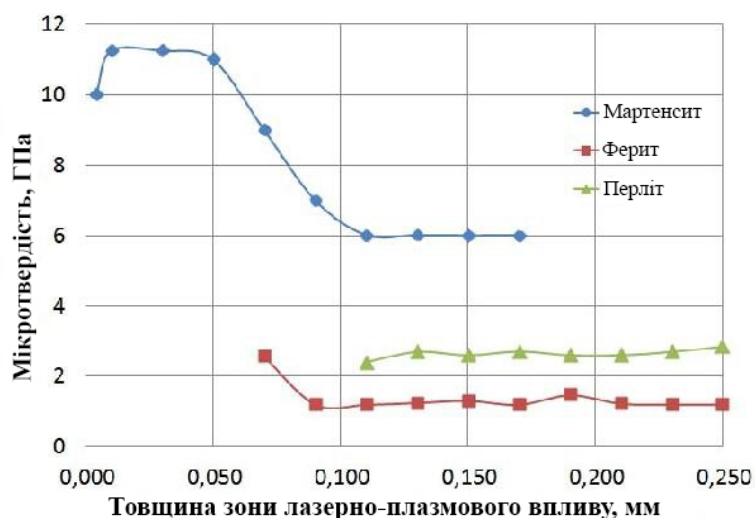


Рисунок 2 – Розподіл мікротвердості структурних складових за глибиною зони лазерно-плазмового впливу у сталі з вихідною ферито-перлітною структурою

Джерело: [14]

Дослідження мікроструктури та мікротвердості в загартованих зонах показали, що на їх будову вихідна структура помітного впливу не надає. У зоні лазерно-плазмового впливу, нагрітій при обробці до температур нижче фазового перетворення, відбувається коагуляція та укрупнення карбідів. При цьому дещо, у межах похибки вимірів, знижується мікротвердість (рис. 3).

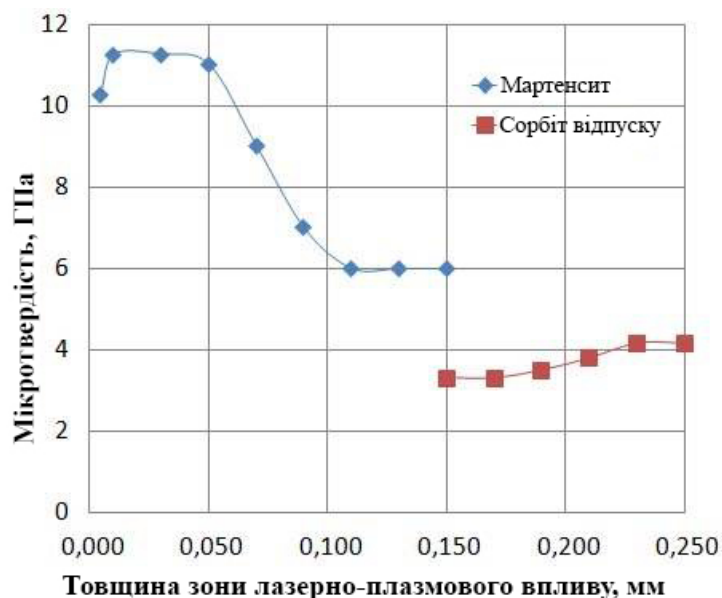


Рисунок 3 – Розподіл мікротвердості структурних складових за глибиною зони лазерно-плазмового впливу у сталі з вихідною структурою сорбіту відпуску

Джерело: [14]

Нарешті було розглянуто особливості мікроструктури та твердості сталі зі структурою *мартенситу* при лазерно-плазмовій обробці [14].

Вихідною структурою зразків, зміцнених попередньою обробкою гартуванням з низьким відпуском, є мартенсит. При лазерній обробці поверхня сталі оплавляється і при подальшому охолодженні загартовується мартенсит. У всіх досліджених зразках при будь-якому стані вихідної структури поверхня отримує зміцнення трохи менше, ніж

нижчі шари. Це викликано, очевидно, частковим вигоранням вуглецю під час розплавлення сталі. До зони, загартованої з рідкого стану, примикає шар, що нагрівся під впливом лазерного променя до температур аустенізації, тобто загартований із твердого стану.

Як і в описаних вище випадках, твердість загартованих шарів при лазерно-плазмовому впливі перевищує твердість, що досягається при інших видах гартування. В даному випадку отримано мікротвердість  $H_{50}$ , що сягає до 11,09 ГПа. Високу твердість має як шар, загартований з рідкого стану, так і шар, нагрітий при лазерно-плазмовому впливі до аустенітного стану з  $H_{50}$ , що сягає до 8,1 ГПа (рис. 4).



Рисунок 4 – Розподіл мікротвердості структурних складових за глибиною зони лазерно-плазмового впливу у сталі з вихідною структурою мартенситу

Джерело: [14]

Шар із мартенситною структурою межує з ділянками, в яких при лазерному нагріванні пройшла неповна фазова перекристалізація. При нагріванні аустенітне перетворення починається від меж відповідних зон. При подальшому охолодженні ці ділянки зазнають мартенситного перетворення. Ділянки, що не зазнали аустенітного перетворення в результаті термічного циклу при лазерно-плазмовому впливі, отримують короткочасний відпуск. Твердість цих ділянок у результаті відпуску знижується до 4,3 ГПа.

**Висновки.** Лазерно-плазмова обробка може застосовуватись з високою ефективністю для зміцнення конструкційних сталей. Вона дозволяє здійснювати зміцнення поверхні конструкційної сталі до високої твердості 9–11 ГПа на глибину близько 0,2 мм. При цьому ефект зміцнення отриманий на сталях із різною структурою, характерною для різних етапів технологічного процесу. Отже, застосування лазерно-плазмової обробки для зміцнення поверхні можливе на різних етапах технологічного процесу виготовлення чи ремонту деталей автомобільного транспорту в АПК.

## Список літератури

1. Заболотный В.И., Ковальчук Ю.А. Модель отражающей поверхности лазерного канала разведки информации. *Прикладная радиоэлектроника*. 2007. Т. 6, № 3. С. 432–434.
2. Огин П.А. Структура и свойства зон перекрытия при лазерной закалке сталей и чугунов. Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2 (32-2). С. 130–135.

3. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15. № 4. С. 846–855.
4. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 48. С. 54–61.
5. Rutkowski, D., Ambroziak, A. Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014. № 5, 49–57.
6. Огин П.А. Повышение эксплуатационных характеристик деталей из чугунов с применением закалки оптоволоконным лазером. Вестник Нижегородского государственного инженерно-экономического института. Серия «Технические науки». 2015. № 12 (55). С. 55–58.
7. Ковальчук Ю.О., Кравченко В.В., Оляднічук Р.В. Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2017. Вип. 5. С. 92–99.
8. Laser-plasma treatment of structural steel / A. Tokarev et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 58–62.
9. Рыкалин Н.Н., Углов А.А. Лазерно-плазменная обработка металлов при высоких давлениях газов. *Квантовая электроника*. 1981. Т. 8. № 6. С. 1193–1201.
10. Schaaf P. Laser nitriding of metals. *Progress in Materials Science*. 2002. Vol. 47. P. 1–161.
11. Microstructure of TiN coatings synthesized by direct pulsed Nd:YAG laser nitriding of titanium: Development of grain size, microstrain, and grain orientation / D. Hoche et al. *Applied Physics A*. 2008. Vol. 91. P. 305–314.
12. Применение метода лазерно-плазменной модификации поверхности металлов для улучшения триботехнических характеристик цилиндров двигателей внутреннего сгорания / Багаев С.Н. и др. *Обработка металлов*. 2014. № 1 (62). С. 14–23.
13. Модификация поверхности серого чугуна методом лазерно-плазменной обработки / Багаев С.Н. и др. *Актуальные проблемы в машиностроении: материалы первой междунар. науч.-практ. конф.* (Новосибирск, 26 марта 2014). Новосибирск, 2014. № 1. С. 229–235.
14. Влияние предварительной термообработки конструкционной стали на эффект упрочнения при лазерно-плазменном воздействии / Багаев С.Н. и др. *Актуальные проблемы в машиностроении: материалы третьей междунар. науч.-практ. конф.* (Новосибирск, 30 марта 2016). Новосибирск, 2016. № 3. С. 389–397.

## References

1. Zabolotnyi, V.I. & Kovalchuk, Yu.A. (2007). Model otrazhayushchey poverkhnosti lazernogo kanala razvedki informatsii [Model of the reflective surface of the laser intelligence channel]. *Prikladnaya radioelektronika – Applied radio electronics*, Vol. 6, 3, 432–434 [in Russian].
2. Ogin, P.A. (2015). Struktura i svojstva zon perekrytija pri lazernoj zakalke stalej i chugunov [The structure and properties of overlap zones in laser hardening of steels and cast irons]. *Vektor nauki Tol'jattinskogo gosudarstvennogo universiteta – Science vector of Togliatti State University*, 2 (32-2), 130-135 [in Russian].
3. Zavoiko, O.S. (2014). Doslidzhennia lazernoho zmitsnennia kolinchatykh valiv ta mekhaniko-termichnoi obrobky pry ruinuvanni na vtomu ta znos [Investigation of laser hardening of crankshafts and mechanical-thermal treatment in case of fatigue and wear destruction]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, Vol. 15, 4, 846-855 [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, Yu.O. & Lisovyi I.O. (2018). Doslidzhennya struktury ta mikrotverdosti obroblenoyi lazerom poverkhni chavuniv [Investigation of the structure and microhardness of a laser-treated cast iron surface]. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn: Zahalnodержavnii mizhvidomchyi naukovo-tekhnichnyi zbirnyk – Design, manufacture and operation of agricultural machinery: National interagency scientific and technical collection, issue 48*, 54–61 [in Ukrainian].
5. Rutkowski, D. & Ambroziak, A. (2014). Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 49–57 [in English].
6. Ogin, P.A. (2015). Povyshenie jekspluatacionnykh harakteristik detalej iz chugunov s primeneniem zakalki optovolokonnyim lazerom [Improving the performance of parts made of cast iron using hardening with a fiber-optic laser]. *Vestnik Nizhegorodskogo gosudarstvennogo inzhenerno-jekonomicheskogo instituta. Serija «Tehnicheskie nauki» – Bulletin of the Nizhny Novgorod State Engineering and Economic Institute. Series «Technical Sciences»*, 12 (55), 55-58 [in Russian].
7. Kovalchuk, Yu.O., Kravchenko, V.V. & Olyadnichuk, R.V. (2017). Lazerna obrobka detaley silskohospodarskoyi tekhniki z chavunu [Laser processing of parts of agricultural machinery from cast iron]. *Visnyk Ukrainyinskoho viddilennya Mizhnarodnoyi akademiyi ahrarnoyi osvity – Bulletin of*

- the Ukrainian branch of the International Academy of Agrarian Education, issue 5, 92–99 [in Ukrainian].
8. Tokarev, A., Bataeva, Z., Grachev, G., Smirnov, A., Khomyakov, M. & Gerber, A. (2015). Laser-plasma treatment of structural steel. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 788, 58–62 [in English].
  9. Rykalin, N.N. & Uglov, A.A. (1981). Lazerno-plazmennaya obrabotka metallov pri vysokikh davleniyakh gazov [Laser-plasma processing of metals at high gas pressures]. *Kvantovaya elektronika – Quantum electronics*, Vol. 8, 6, 1193–1201 [in Russian].
  10. Schaaf, P. (2002). Laser nitriding of metals. *Progress in Materials Science*, Vol. 47, 1–161 [in English].
  11. Hoche, D., Schikora, H., Zutz, H., Queitsch, R., Emmel, A. & Schaaf, P. (2008). Microstructure of TiN coatings synthesized by direct pulsed Nd:YAG laser nitriding of titanium: Development of grain size, microstrain, and grain orientation. *Applied Physics A*, Vol. 91, 305–314 [in English].
  12. Bagaev, S.N., Grachev, G.N., Smirnov, A.L., Khomyakov, M.N., Tokarev, A.O. & Smirnov, P.Yu. (2014). Primeneniye metoda lazerno-plazmennoy modifikatsii poverkhnosti metallov dlya uluchsheniya tribotekhnicheskikh kharakteristik tsilindrov dvigateley vnutrennego sgoraniya [Application of the method of laser-plasma modification of the surface of metals to improve the tribotechnical characteristics of cylinders of internal combustion engines]. *Obrabotka metallov – Metal processing*, 1 (62), 14–23 [in Russian].
  13. Bagaev, S.N., Grachev, G.N., Smirnov, A.L., Khomyakov, M.N. & Tokarev, A.O. (2014). Modifikatsiya poverkhnosti serogo chuguna metodom lazerno-plazmennoy obrabotki [Modification of the surface of gray cast iron by laser-plasma treatment]. *Aktualnye problemy v mashinostroyenii: materialy pervoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (26 marta 2014 goda) – Actual problems in mechanical engineering: materials of the first international scientific and practical conference*, 1. (pp. 229–235). Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU [in Russian].
  14. Bagaev, S.N., Grachev, G.N., Smirnov, A.L., Khomyakov, M.N., Tokarev, A.O., Bataeva Z.B. et al. (2016). Vliyaniye predvaritelnoy termoobrabotki konstruktsionnoy stali na effekt uprochneniya pri lazerno-plazmennom vozdeystvii [Influence of preliminary heat treatment of structural steel on the hardening effect under laser-plasma action]. *Aktualnye problemy v mashinostroyenii: materialy tretyey mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (30 marta 2016 goda) – Actual problems in mechanical engineering: materials of the third international scientific and practical conference*, 3. (pp. 389–397). Novosibirsk: Izdatelstvo NGTU [in Russian].

**Yuriy Kovalchuk**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisovyi**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

*Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine*

### **Laser-plasma Strengthening of Pre-heat-treated Road Transport Details in the Agro-industrial Complex**

The aim of the work is to determine the laser-plasma effect on the structure and microhardness of surfaces of ordinary and after heat treatment by hardening with low and high tempering steel 40HN with different structure, to study the possibility of laser-plasma treatment to strengthen the surface at different stages of manufacturing or repair transport details in the agro-industrial complex.

The article presents the results of laser-plasma exposure to the structure and microhardness of surfaces of ordinary and after heat treatment by hardening with low and high tempering steel 40HN with different structure: normalized or annealed steel immediately after machining, and after volumetric heat treatment with different types tempering for different hardness, determined by the purpose of the workpieces. First, the features of the microstructure and hardness of steel with a ferritic-pearlitic structure during laser-plasma treatment were studied. The highest temperature, which causes melting and evaporation of the material, during laser treatment occurs on the surface of the processed products. During further cooling due to intensive heat dissipation into the cold core of the metal in the melting zone is hardening from the liquid state and the formation of martensite. Adjacent to these areas is the zone of martensite obtained by quenching during cooling from the solid austenitic state. Then the influence of laser-plasma treatment on the features of the microstructure and hardness of steel with the structure of tempering sorbitol and with the structure of martensite was considered.

Laser-plasma treatment can be used with high efficiency to strengthen structural steels. It allows to strengthen the surface of structural steel to a high hardness of 9-11 GPa to a depth of about 0.2 mm. The hardening effect is obtained on steels with different structure, characteristic for different stages of the technological process. Therefore, the use of laser-plasma treatment to strengthen the surface is possible at different stages of the technological process of manufacturing or repairing parts of road transport in agriculture.

**laser plasma, optical pulsating discharge, hardening, microhardness, road transport details in the agro-industrial complex**

*Одержано (Received) 12.11.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 17.11.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*