

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.31 DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.54-61>

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

Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів

Проаналізовано вплив лазерної обробки на властивості поверхневого шару чавуну. Визначено структуру та мікротвердість зон лазерного впливу для чавуну марок СЧ21 і ВЧ40. Відмічено, що застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару та поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної. Досліджено, що для зміцнення чавунів крім потужних СО₂-лазерів можуть ефективно використовуватися твердотільні YAG-лазери потужністю від 400 Вт і вище.

метод поверхневої лазерної обробки, лазерне зміцнення, гартування, чавун, зносостійкість, деталі сільськогосподарської техніки

Ю.А. Ковальчук, доц., канд. техн. наук, **И.А. Лисовый**, канд. техн. наук
Уманский национальный университет садоводства, г.Умань, Украина

Исследование структуры и микротвердости обработанной лазером поверхности чугунов

Проанализировано влияние лазерной обработки на свойства поверхностного слоя чугуна. Определена структура и микротвердость зон лазерного воздействия для чугуна марок СЧ21 и ВЧ40. Отмечено, что применение быстрого сканирования лазерного пучка поперек направления движения обеспечивает сглаживание поверхностного рельефа оплавленного слоя и улучшения формы сечения закаленной полосы, приближая ее к прямоугольной. Исследовано, что для упрочнения чугунов кроме мощных СО₂-лазеров могут эффективно использоваться твердотельные YAG-лазеры мощностью от 400 Вт и выше.

метод поверхностной лазерной обработки, лазерное упрочнение, закаливание, чугун, износостойкость, детали сельскохозяйственной техники

Постановка проблеми. Нині не втрачає своєї актуальності питання збільшення ресурсу виробітку різних деталей сільськогосподарської техніки із чавуну. Однією із першочергових задач, що стоять перед виробниками сільськогосподарських машин, є забезпечення вищої міцності та зносостійкості деталей, які найбільше піддаються зносу та виходять з ладу.

Для зміцнення різноманітних деталей сільськогосподарської техніки може застосовуватися метод поверхневої лазерної обробки. Він є одним з методів покращення характеристик деталей сільськогосподарської техніки із чавуну.

Лазерна обробка може забезпечити значне підвищення міцності, а при правильному виборі марки сплаву, режимів застосування лазерного випромінювання та подальшій обробці зміцнених зразків – ще й підвищення пластичності, ударної в'язкості та зносостійкості матеріалу.

Однак, різні дослідження виконуються за різних умов лазерної обробки. Не відбувається їх систематизації та узагальнення.

Тому актуальним та важливим на даний момент є системне дослідження впливу лазерного випромінювання на зміцнювану поверхню чавуну для подальшого забезпечення потрібних характеристик відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженнями лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки займалися як наші вітчизняні вчені [1-5], так і вчені за кордоном [6-11]. Дані дослідження потребують достатньо потужну матеріальну базу та відповідне фінансування. Впровадження останніх досягнень лазерних технологій у сільське господарство, а, зокрема, у зміцнення різних деталей відповідної техніки, є непростим та затратним у відношенні як відповідних матеріальних ресурсів, так і стосовно необхідного часу для проведення дослідів та аналізу отриманих результатів, розробки конкретних технологій лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки.

Питаннями, що пов'язані із впливом лазерного випромінювання на характеристики чавуну займався, зокрема, А.Г. Григорьянц в праці [8]. В даній роботі досліджувався вплив деяких параметрів процесу лазерної обробки на отримувані характеристики чавунів та особливості внутрішніх перетворень в даному сплаві під дією лазерного променя.

Дослідженням структури та властивостей зон перекриття в результаті лазерної обробки та підвищенням експлуатаційних характеристик деталей із чавуну шляхом застосування оптоволоконного лазера останнім часом займався, зокрема, П.А. Огін [7, 10]. Лазерне зміцнення колінчатих валів із чавуну досліджував також О.С. Завойко [1].

Залишкові напруження на поверхні залізобетонних сплавів, їх значення та знаки під час лазерної обробки досліджували А.Г. Григорьянц [8], В.С. Майоров [6] та інші вітчизняні та закордонні вчені.

Дані дослідження переважно мають несистемний характер та не охоплюють все коло пов'язаних із лазерним зміцненням питань. Узагальнення різних досліджень відбувається недостатньо. Отримані результати конкретних досліджень та їх пояснення одними авторами не є очевидними для інших авторів, результати яких отримуються при в значній мірі подібних параметрах процесу лазерної обробки.

Існує об'єктивна необхідність узагальнення отриманих результатів різних авторів, їх систематизації та розробки більш широкої системи знань щодо процесу лазерного зміцнення сплавів.

Зокрема, потребує більш глибокого та різностороннього дослідження структура та мікротвердість поверхневого шару чавуну в результаті впливу лазерного випромінювання.

Постановка завдання. Метою роботи є визначення впливу лазерної зміцнюючої обробки на структуру та мікротвердість поверхневого шару чавуну для покращення експлуатаційних характеристик відповідних деталей сільськогосподарської техніки.

Виклад основного матеріалу. Чавун має гарні ливарні властивості, високі показники міцності та піддається механічній обробці.

Для ефективного застосування лазерної обробки деталей із чавуну потрібно мати чіткі уявлення про структуру та мікротвердість зміцненого лазером поверхневого шару. Це дозволить, у свою чергу, розробити технології лазерної обробки чавунних виробів із забезпеченням необхідного рівня міцності та зносостійкості.

Для оптимізації технологічного процесу гартування поверхні чавунів лазером необхідно оцінити вплив тривалості дії випромінювання τ на структуру та твердість даних сплавів.

Так, здійснюючи лазерну обробку безперервним CO₂-лазером, при зміні τ для чавуну СЧ21 в межах 0,16-1,2 с, швидкість охолодження нагрітого об'єму металу перевищує критичну швидкість загартування, про що свідчить характер отриманих в зоні лазерного впливу (ЗЛВ) структур (рис. 1) та їх твердість (рис. 2) [6].

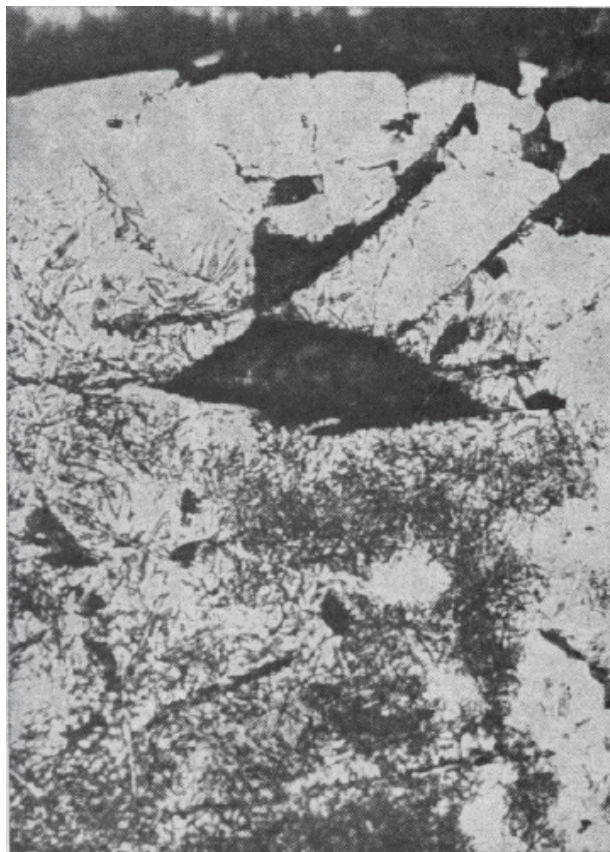


Рисунок 1 – Структура чавуну СЧ21 в зоні лазерного впливу при $\tau = 1,2$ с (x500)
 Джерело: розроблено автором на підставі [6]

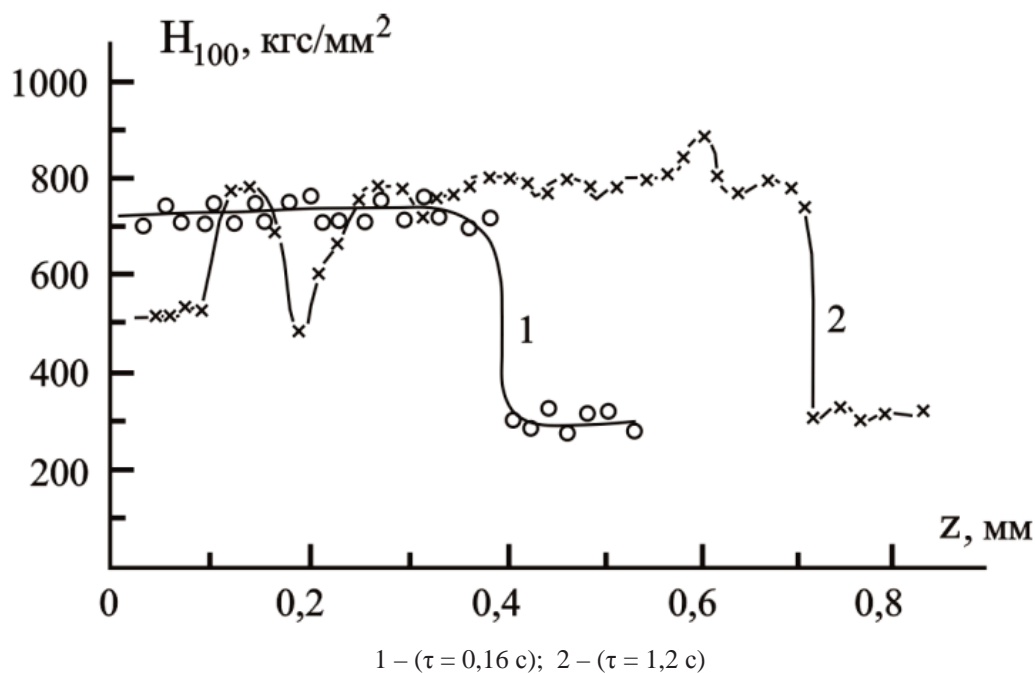


Рисунок 2 – Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерного впливу в чавуні СЧ21 ($P_0 = 2,2$ кВт)

Джерело: розроблено автором на підставі [6]

На співвідношення аустенітної та мартенситної складових в чавуні СЧ21 в структурі ЗЛВ істотно впливає тривалість впливу випромінювання. Зі збільшенням τ в приповерхневому шарі та в глибині ЗЛВ з'являються окремі ділянки залишкового аустеніту (рис. 1) з мікротвердістю $H_{100} = 500-560$ кгс/мм². В глибинних областях ЗЛВ аустеніт локалізується навколо включень фосфідної евтектики, тобто в найбільш збагачених вуглецем ділянках.

Структурна неоднорідність за глибиною ЗЛВ, що виникає при збільшенні τ , супроводжується нерівномірним розподілом твердості. На кривій мікротвердості, що відповідає $\tau = 1,2$ с (рис. 2), є провали, пов'язані з попаданням індентора мікротвердоміру ПМТ-3 на аустенітні ділянки. Спостережуване збільшення кількості залишкового аустеніту з ростом τ , ймовірно, пов'язане з великим насиченням твердого розчину вуглецем.

Вибір режиму гартування чавуну СЧ21 та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися з урахуванням умов експлуатації конкретної деталі, так як аустеніт може надавати різний вплив на зносостійкість. Стосовно пари тертя, наприклад, циліндр двигуна – компресійне кільце, залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню даної пари.

Застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної, і згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару.

Для лазерного зміцнення високоміцного чавуну ВЧ40 з оплавленням використовувався твердотільний YAG-лазер з двокоординатним сканатором потужністю $P_0 = 400$ Вт при наступних параметрах обробки: швидкість переміщення зразка $V = 1,7$ см/с, радіус лазерного пучка $R = 0,5$ мм, амплітуда сканування $q = 2,6$ мм, частота сканування $f = 160$ Гц [6].

Після лазерної обробки відповідні шліфи зразків досліджувалися традиційними металографічними методами.

Форма перерізу загартованих смуг стала близька до прямокутної. Глибина зони оплавлення складала 0,05...0,1 мм, зони гартування з твердого стану – 0,1...0,15 мм, а загальна глибина гартування – 0,15...0,25 мм. Ширина загартованої смуги – 2,7...3,1 мм. Мікротвердість вибіленого шару високоміцного чавуну ВЧ40 складала $7 \cdot 10^3 \dots 8,7 \cdot 10^3$ МПа, а в зоні лазерного гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури – $6 \cdot 10^3 \dots 7,5 \cdot 10^3$ МПа.

Структура зони лазерної обробки чавуну ВЧ40 зображена на рис. 3, а характерний розподіл значень мікротвердості за глибиною зони лазерної обробки наведено на рис. 4 [6]. Розкид значень геометричних розмірів та мікротвердості пов'язаний з відмінностями у вихідній структурі сплаву зразків з різних партій лиття, а також не завжди стабільною якістю фосфатування та, відповідно, коефіцієнтом поглинання лазерного випромінювання.

Лазерна обробка чавунів з оплавленням призводить до розчинення графіту в розплаві, внаслідок чого в зоні оплавлення (світла смуга на рис. 3) при кристалізації формується структура вибіленого чавуну. Після лазерної обробки в цій зоні майже не спостерігаються залишки графітних включень. Це пов'язано з використанням швидкого поперечного сканування, коли на кожну ділянку оброблюваної поверхні протягом доли секунди фактично діє послідовність багатьох десятків лазерних імпульсів (джерело тепла носить імпульсно-періодичний характер).

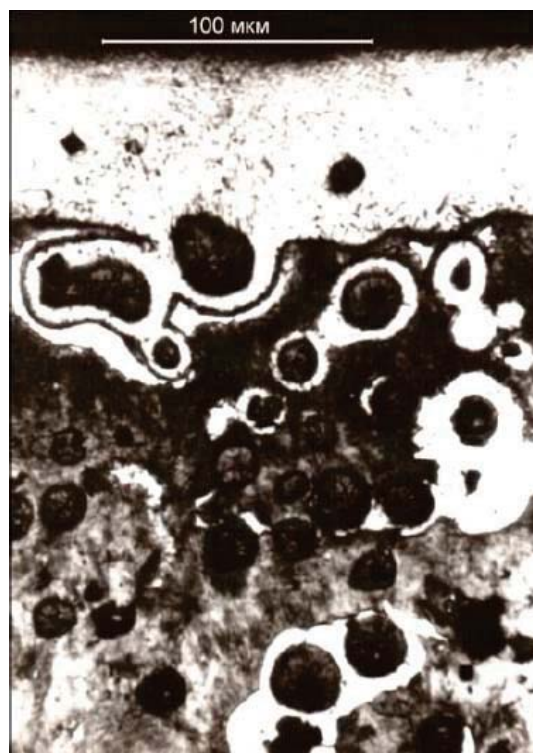


Рисунок 3 – Зона лазерного гартування чавуну ВЧ40 (x200)

Джерело: розроблено автором на підставі [6]

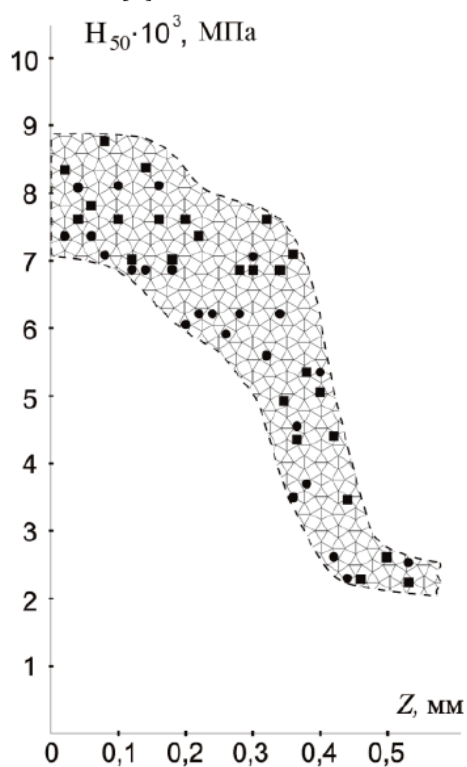


Рисунок 4 – Розподіл мікротвердості за глибиною зони лазерної обробки чавуну ВЧ40

Джерело: розроблено автором на підставі [6]

Повне розчинення графіту створює умови для збільшення частки цементиту. Кристалізація відбувається при високих швидкостях охолодження і здійснюється за механізмом, близьким до квазіевтектичного без виділення вільного графіту. У структурі вибіленого чавуну спостерігається вирівнювання концентрації кремнію, сама структура значно подрібнена. Між осередками аустеніту в міждендритних проміжках структура має вигляд нерівноважної суміші заевтектичного виду з великою кількістю цементиту, що визначає високу твердість цієї зони.

Зона гартування з твердої фази має дуже неоднорідну структуру. У її верхній частині (поблизу нижньої межі зони оплавлення) навколо графітних включень є світлі смуги в 10...20 мкм, які свідчать про те, що тут мало місце локальне оплавлення та значне насичення матриці вуглецем з графітних включень. При насиченні до формування аустеніто-цементитної структури мікротвердість цих смуг досить висока.

Поруч з графітом утворюється шар з переважанням цементиту, далі – пластинчастий ледебурит, ледебурит і аустеніт, однорідний аустеніт та, нарешті, аустенітно-мартенситна голчата структура. У середній області зони гартування з твердої фази є чергування світлих та темних ділянок, що обумовлюється насиченням матриці вуглецем до різного рівня на різних відстанях від графітних включень. У нижній частині насичення матриці вуглецем незначне.

Таким чином, виконуються загальні вимоги до результатів лазерного гартування. Ресурс роботи відповідних зміцнених деталей сільськогосподарської техніки в результаті застосування методу поверхневої лазерної обробки значно збільшиться.

Проведені дослідження підтвердили, що технологічні установки з твердотільними лазерами потужністю від 400 Вт і вище можуть ефективно використовуватися для поверхневого гартування залізовуглецевих сплавів та успішно конкурувати з більш потужними CO₂-лазерами.

Висновки. Отже, поверхнева лазерна обробка може бути успішно застосована також і для використовуваного вітчизняними виробниками деталей сільськогосподарської техніки чавуну, що надасть змогу забезпечити значне підвищення експлуатаційних характеристик відповідних виробів та створить передумови для заміни чавуном у певних випадках значно дорожчих сталей.

Внаслідок можливості аустеніту надавати різний вплив на зносостійкість сплавів вибір режиму гартування чавуну СЧ21 та відповідного йому структурного стану в ЗЛВ повинен проводитися з урахуванням умов експлуатації конкретної деталі. Наприклад, для пари тертя циліндр двигуна – компресійне кільце залишковий аустеніт може сприяти кращому припрацюванню даних деталей.

Застосування швидкого сканування лазерного пучка поперек напрямку руху забезпечує згладжування поверхневого рельєфу оплавленого шару та поліпшення форми перерізу загартованої смуги, наближаючи її до прямокутної.

Внаслідок лазерного гартування високоміцного чавуну ВЧ40 при вказаних в роботі параметрах мікротвердість вибіленого шару склала $7 \cdot 10^3 \dots 8,7 \cdot 10^3$ МПа, а в зоні лазерного гартування з твердого стану для аустенітно-мартенситної структури – $6 \cdot 10^3 \dots 7,5 \cdot 10^3$ МПа.

Для поверхневого гартування залізовуглецевих сплавів крім потужних CO₂-лазерів можуть ефективно використовуватися технологічні установки з твердотільними YAG-лазерами потужністю від 400 Вт і вище.

Розробка та впровадження у виробництво конкретних технологій лазерного зміцнення деталей сільськогосподарських машин із чавуну стане можливим за умови підтримки даних досліджень з боку держави.

Список літератури

1. 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.
2. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки: навч. посібник. Київ: Кондор, 2008. 166 с.
3. Пашкова Г.І. Підвищення працездатності чавунних колінчастих валів потужних транспортних дизелів комбінованими методами зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Харк. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків, 2008. 24 с.
4. Ковальчук Ю.О., Невзоров А.В., Кравченко В.В. Застосування лазерної обробки сталі 45 для підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*, 2015. Вип. 3. С. 171–176.
5. Бобрицький В.М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.04 / Національний транспортний ун-т. Київ, 2007. 20 с.
6. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / под ред. В.Я. Панченко. Москва: Физматлит, 2009. 664 с.
7. 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.
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца; 2-е изд., стереотип. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 664 с.
9. Бирюков В.П. Повышение износостойкости деталей сельскохозяйственной техники и почвообрабатывающих орудий лазерным упрочнением и наплавкой. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве: тематический сборник*. Москва: Техносфера, 2008. С. 256–264.
10. 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.
11. Буханова И.Ф., Дивинский В.В., Журавель В.М. Применение лазерного излучения для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственного машиностроения. *Лазерные технологии в сельском хозяйстве: тематический сборник*. Москва: Техносфера, 2008. С. 264–270.

References

1. Zavoiko, O.S. (2008). Doslidzhennia lazernoho zmitsnennia kolinchatykh valiv ta mekhaniko-termichnoi obrobky pry ruinuванні na vtomu ta znos [Investigation of laser hardening of crankshafts and mechanical-thermal treatment in case of fatigue and wear destruction]. *Fizyka i khimiia tverdogo tila – Physics and Chemistry of the Solid State*, Vol. 15, 4, 846-855 [in Ukrainian].
2. Chernenko, V.S., Kindrachuk, M.V., & Dudka, O.I. (2008). *Promenevi metody obrobky [Radial processing methods]*. Kyiv: Kondor [in Ukrainian].
3. Pashkova, H.I. (2008). Pidvyshchennia pratsezdatsnosti chavunnykh kolinchastykh valiv potuzhnykh transportnykh dyzeliv kombinovany my metodamy zmitsnennia [Improvement of efficiency of cast-iron crankshafts of powerful transport diesel engines by combined methods of strengthening]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
4. Kovalchuk, Yu.O., Nevzorov, A.V., & Kravchenko, V.V. (2015). Zastosuvannia lazernoi obrobky stali 45 dlia pidvyshchennia znosostiikosti detalei silskohospodarskykh mashyn [Application of laser treatment of steel 45 to improve the wear resistance of parts of agricultural machines]. *Visnyk Ukrainskoho viddilennia Mizhnarodnoi akademii ahrarnoi osvity – Bulletin of the Ukrainian Branch of the International Academy of Agrarian Education*, issue 3, 171-176 [in Ukrainian].
5. Bobrytskyi, V.M. (2007). Pidvyshchennia znosostiikosti rizalnykh elementiv robochykh orhaniv ґрунтообробnykh mashyn [Increase wear-resistance of cutting elements of working bodies of soil-working machines]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].

6. Panchenko, V.Ja. (Eds.). (2009). *Lazernye tehnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nyh issledovanij i prikladnyh razrabotok [Laser technologies for processing materials: modern problems of fundamental research and applied development]*. Moskva: Fizmatlit [in Russian].
7. Ogин, P.A. (2015). Povyshenie jekspluatacionnyh karakteristik 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]*.
8. Grigor'janc, A.G., Shiganov, I.N., & Misjurov, A.I. (2008). Tehnologicheskie processy lazernoj obrabotki [Technological processes of laser handling]. A.G. Grigor'janc (Ed.) (2-d ed.). Moskva: Izd-vo MGTU im. N.Je. Bauman [in Russian].
9. Birjukov, V.P. (2008). Povyshenie iznosostojkosti detalej sel'skohozjajstvennoj tehniky i pochvoobrabatyvajushhih orudij lazernym uprochneniem i naplavkoj [Increasing the durability of parts of agricultural machinery and tillage tools with laser hardening and surfacing]. *Lazernye tehnologii v sel'skom hozjajstve – Laser technologies in agriculture*. Moskva: Tehnosfera [in Russian].
10. Ogин, P.A. (2015). Struktura i svoystva 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]*.
11. Buhanova, I.F., Divinskij, V.V., & Zhuravel, V.M. (2008). Primenenie lazernogo izluchenija dlja uprochnenija i vosstanovlenija detalej sel'skohozjajstvennogo mashinostroenija [The use of laser radiation for hardening and restoration of agricultural engineering parts]. *Lazernye tehnologii v sel'skom hozjajstve – Laser technologies in agriculture*. Moskva: Tehnosfera [in Russian].

Yuriy Kovalchuk, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Ivan Lisoviy**, PhD tech. sci.
Uman National University of Horticulture, Uman, Ukraine

Investigation of the Structure and Microhardness of the Laser-treated Surface of the Cast Irons

The purpose of this work is to study the method of surface laser treatment regarding the effect of laser radiation on the structure and microhardness of laser influence zones in the surface layer of cast iron to improve performance characteristics such as hardness and wear resistance of the corresponding parts of agricultural machinery.

The ratio of austenitic and martensitic components in SCh21 cast iron in the structure of the hardened layer is significantly affected by the duration of the radiation effect. With its increase in the near-surface layer and in the depth of the laser-impact zone, separate areas of residual austenite with microhardness $H_{100} = 500-560$ kgf/mm² appear. In the deep areas of the hardened layer, austenite is localized around phosphide eutectic inclusions, that is, in the most carbon-rich areas. Due to laser hardening of high-strength HF40 cast iron with the parameters specified in the work, the microhardness of the bleached layer was $7 \cdot 10^3 \dots 8.7 \cdot 10^3$ MPa, and in the laser hardening zone from the solid state for austenitic-martensitic structure - $6 \cdot 10^3 \dots 7.5 \cdot 10^3$ MPa. The choice of the hardening mode of cast iron SCh21 and the corresponding structural state in the zone of laser influence should be carried out taking into account the operating conditions of a particular part, since austenite may have a different effect on the wear resistance. For example, with respect to the friction pair of an engine cylinder – a compression ring, residual austenite may contribute to a better running-in of these parts.

The use of fast scanning of a laser beam across the direction of motion provides smoothing of the surface relief of the melted layer and improving the shape of the hardened strip, bringing it closer to a rectangular one. In addition to high-power CO₂ lasers, solid-state YAG lasers with a power of 400 W and more can be effectively used for hardening cast irons. Thus, surface laser treatment can also be successfully applied to cast iron, used by domestic manufacturers of agricultural machinery parts. This will ensure a significant increase in the performance characteristics of the respective products and will create prerequisites for the replacement of significantly more expensive steels with cast irons in certain cases.

method of surface laser treatment, laser hardening, tempering, cast iron, wear resistance, agricultural machinery parts

Одержано (Received) 11.12.2018

Прорецензовано (Reviewed) 17.11.2018

Прийнято до друку (Approved) 20.12.2018