

**Джемелінський В.В.**

к. т. н., професор

**Лесик Д.А.**

к.т.н.

**Данилейко О.О.**

аспірант

*Національний технічний  
університет України  
«Київський політехнічний  
інститут імені Ігоря  
Сікорського»*

**Бернадський А.В.**

к.т.н.

*Інститут  
електрозварювання  
ім. Є.О. Патона  
Національної академії  
наук України*

**Dzhemelinskyi V.****Lesyk D.****Danyleiko O.**

*National Technical  
University of Ukraine "Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnic  
Institute"*

**Bernatskyi A.**

*E.O. Paton Electric Welding  
Institute of the National  
Academy of Sciences of  
Ukraine*

**УДК 621.924.93:621.9.048.7****DOI: 10.37128/2306-8744-2020-1-11**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ КОМБІНОВАНОЮ ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОЮ ОБРОБКОЮ**

У статті розглянуто перспективи використання комбінованої термодеформаційної поверхневої обробки для підвищення експлуатаційних властивостей металевих виробів. Запропоновано новий спосіб термодеформаційного поверхневого зміцнення (дробострумнна обробка (ДСО) з наступною лазерною термообробкою (ЛТО)) для інструментів та корпусів коронок, які працюють в складних умовах. Для проведення експериментальних досліджень було обрано плоскі зразки із сталі 30ХГСА та сталі 45. Попереднє зміцнення та оздоблювання статичними або динамічними методами поверхнево-пластичним деформуванням проводили на модернізованій установці на базі верстата з числовим програмним керуванням «DYNAMITE 2800», а ДСО реалізували на промисловому обладнанні. Лазерне поверхнєве зміцнення зразків проводили одиночними проходами зі швидкістю переміщення зразка 300...500 мм/хв при діаметрі лазерного променя 7,3 мм та потужності лазера 1 кВт з використанням технологічної установки «ROFIN-SINAR DY 044». Визначено оптимальні режими поверхневого зміцнення при деформаційній дії газодинамічного потоку з твердими частками та термічної дії лазерним променем для отримання максимальних величин глибини зміцнення та твердості. Зокрема, при ДСО тиск подачі газозульфового потоку складає 0,5 МПа, тривалість обробки 1 хв незалежно від типу матеріалу. Оптимальна потужність лазерного променя складала 1 кВт при швидкості переміщення зразка 300 мм/хв. Приведено результати експериментальних досліджень зміни глибини зміцнення від часу та тиску після ДСО, швидкості переміщення оброблюваного зразка із вуглецевої сталі 45 та середньолегованої сталі 30ХГСА після ЛТО та комбінованої ДСО+ЛТО, а також розподіл мікротвердості по глибині зміцненого шару. Виявлено, що комбінована ДСО+ЛТО сталі 30ХГСА при оптимальних режимах формує у 1,5 рази (1,3 мм) більшу глибину зміцненого поверхневого шару у порівнянні з ЛТО, одночасно забезпечуючи твердість поверхневого шару ~5400 МПа.

**Ключові слова:** комбінована термодеформаційна поверхнева обробка, дробострумнна обробка, лазерна термообробка, сталь 30ХГСА, сталь 45, глибина зміцнення, твердість



**Постановка проблеми.** Відомо [1], що ефективно формування поверхонь металевих виробів з урахуванням критеріїв міцності, створення дисперсної структури із залишковими напруженнями стиску, а також отримання необхідної мікрогеометрії поверхні, може бути досягнене завдяки металургійним та термдеформаційним процесам з реалізацією гібридних або комбінованих технологій. Останнім часом з цією метою використовують процеси фізико-технічної обробки, які полягають у використанні висококонцентрованих та імпульсних джерел енергії, зокрема лазерного і електронного променів, плазмової дуги, ультразвуку, електричного розряду, потужних потоків рідини та дрібнорозмірних часток [2; 3].

Однак в публікаціях недостатньо розкриті питання оптимізації режимів гібридних та комбінованих методів поверхневого зміцнення різних металевих виробів з використанням зазначених джерел енергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ресурс роботи багатьох високонавантажених металевих деталей в значній мірі визначається здатністю сполучених пар тертя чинити опір зношуванню, тому в сучасному машинобудуванні перспективним є створення матеріалів із заданими структурою і властивостями за рахунок нових ефективних способів зміцнення. Значне місце у аграрному секторі України займають процеси дроблення органічних матеріалів. Вони істотно впливають на економічні показники багатьох господарств та харчової промисловості нашої країни, а також на якість готових виробів і сировини.

В установках для дроблення головною їх складовою є ротори. Для заміни зношених головних інструментів, – молотків, – доводиться розбирати майже весь ротор, так як це не передбачено конструкцією, а для того, щоб уникнути вібрації дробарки, необхідне точне балансування ротора при кожній їх заміні. Відповідно, одним із слабких місць таких установок є дуже малий термін експлуатації інструментів, які працюють у складних умовах ударних навантажень та тертям з проковзуванням [4]. Водночас ресурс інших елементів установки на 1-2 порядки вищий. Такий термін служби приводить до великої кількості технічних обслуговувань. Саме тому одним із резервів підвищення ефективності даного виробництва є модернізація технологічного обладнання/установок, а також упровадження сучасних технологій при його виготовленні та відновленні [5; 6; 7].

Не менше значення для економіки України мають бурові коронки для буріння свердловин, які працюють в складних умовах ударних навантажень: тертям з

проковзуванням. Відомо, що на бурову коронку діє декілька сил – осьові динамічні навантаження, кручення, згинання, – які призводять до утворення складного напруженого стану в корпусі бурової коронки. Донедавна для його виготовлення використовували сталь 30 та сталь 40 [8]. При цьому у процесі експлуатації спостерігалася значна кількість руйнувань профілю у стінках корпусів. Для ліквідації цих дефектів (11% припадає на руйнування алмазно-твердосплавних пластин, а 6% – на корпус коронки) було запропоновано виготовляти корпус бурових коронок із низько- та середньолегованих сталей, зокрема сталі 30ХГСА, яка має підвищену стійкість до ударних навантажень [9].

Попри те, що сталь 30ХГСА містить легуючі елементи, для досягнення високої міцності, хороших показників ударної в'язкості і витривалості, її потрібно термічно обробити [10], а робочі поверхні піддати поверхневого термомеханічному зміцненню [11] для отримання поверхневого шару з більш якісними фізико-механічними властивостями. Одночасно розробляються комбіновані термдеформаційні методи поверхневої обробки з використанням як динамічних [2; 12], так і статичних методів поверхнево-пластичного деформування (ППД) [3; 6] з наступним термозміцненням висококонцентрованими джерелами енергії.

**Метою досліджень** є підвищення експлуатаційних властивостей інструментів для подрібнення органічних матеріалів та корпусів коронок для буріння шляхом застосування комбінованого термдеформаційного поверхневого зміцнення (дробоструминна обробка з наступною лазерною термообробкою).

**Виклад основного матеріалу.** Залежно від хімічного складу сталі та умов експлуатації виробу поверхневе зміцнення може здійснюватися як суміщеною (гібридна обробка) так і роздільною (комбінована обробка) термічною та деформаційною дією. Суміщена (гібридна) високотемпературна поверхнева термдеформаційна обробка низько- та середньолегованих сталей полягає у високошвидкісному нагріванні лазерним променем до температури існування стабільного аустеніту (вище критичної точки  $A_{c3}$ ) та деформації протягом визначеного часу з наступним високошвидкісним охолодженням.

При використанні низькотемпературної поверхневої обробки, на відміну від високотемпературної, процес пластичного деформування (зміцнення) здійснюють при високошвидкісному охолодженні при визначеній температурі переохолодженого аустеніту, що



сприяє розвитку мартенситного перетворення у межах критичних точок  $M_n$  та  $M_k$ .

Ефективність процесу поверхневого зміцнення газодинамічною ударною дією дрібнорозмірними твердими частками залежить, насамперед, від їх кінетичної енергії, яка визначається швидкістю потоку.

Технологічні рекомендації розрахунків поверхневого зміцнення сталевих виробів лазерним променем та експериментальні дослідження комбінованого термодеформаційного зміцнення приведено у попередніх публікаціях [2; 13; 14].

З метою підвищення експлуатаційних властивостей інструментів для дроблення органічних матеріалів та корпусів бурових коронок, які виготовляються із середньолегованої сталі 30ХГСА, запропоновано новий спосіб термодеформаційної поверхневої обробки виробів (рис. 1) різної геометричної форми з використанням дробоструминної обробки

(ДСО) та наступною лазерною термообработкою (ЛТО). Новий комбінований спосіб зміцнення застосовується для поліпшення мікроструктури, формування залишкових напружень стиску, підвищення механічних властивостей та формування спеціального хвилястого мікрорельєфу на поверхні.

Новим є те, що в способі термодеформаційної поверхневої обробки процес високошвидкісного нагрівання лазерним променем здійснюється після попереднього імпульсного поверхнево-пластичного деформування (ППД) газокуюльковим надзвучковим потоком із сферичними дрібнорозмірними частками, для утворення подрібненої активної структури і залишкових напружень стиску. Одночасно здійснюється термовплив у зоні зміцнення поверхні деталі до температури, яка відповідає області існування стабільного аустеніту з наступним високошвидкісним охолодженням, значення якого вище критичної швидкості гартування.

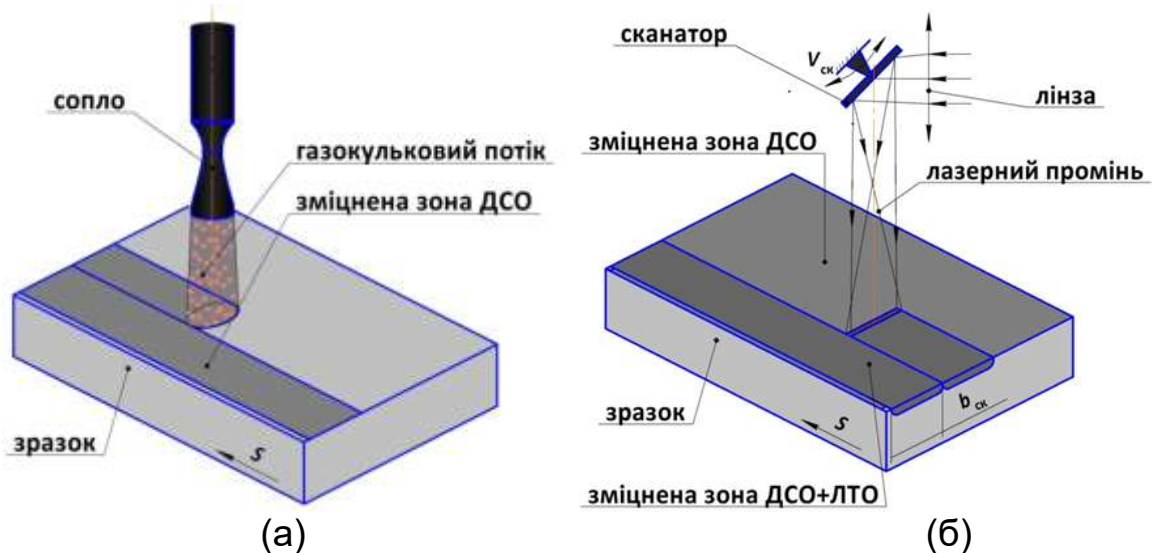


Рис. 1. Схема термодеформаційної поверхневої обробки:  
а – ДСО, б – ЛТО після ДСО

Для проведення досліджень було обрано сталь 30ХГСА і сталь 45, які широко використовуються для виготовлення деталей

машин та інструментів і працюють в екстремальних умовах. Властивості даних матеріалів приведено в таблиці 1 [8].

Таблиця 1

**Механічні властивості сталей після термообробки**

Марка сталі	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердість НВ
30ХГСА	800	950	14	58	–	319...336
Сталь 45	580	785	15	63	140	200...220

Експериментальні дослідження лазерної термообробки проводили на

технологічній установці «ROFIN-SINAR DY 044» потужністю 4,4 кВт. Лазерне випромінювання



передавалося по виготовленому з кварцового скла оптичному волокну діаметром 400 мкм і довжиною 20 метрів.

Поверхнєве зміцнення та оздоблювання статичними та динамічними методами проводили на модернізованій установці на базі верстата з числовим програмним керуванням «DYNAMITE 2800», а дробоструминну обробку – на обладнанні компанії «УКРМІНГЛАСС».

Область технологічних режимів нагрівання лазерним променем та холодного деформування газокуюльковим високошвидкісним потоком здійснено з використанням методу математичного

планування експериментів, виходячи з максимальної глибини зміцнення і твердості.

В результаті проведених досліджень з використанням коаксіального сопла та методу планування експерименту, за основний параметр прийнято глибину зміцнення. На рис.2 приведені результати зміни глибини зміцнення після ДСО, ЛТО та комбінованої ДСО+ЛТО. При ДСО значення глибини зміцнення залежало від кінетичної енергії металевих кульок (дробу), регулювання якої, через відповідні рівняння залежності, здійснювалося зміною тиску на вході коаксіального (надзвукового) сопла.

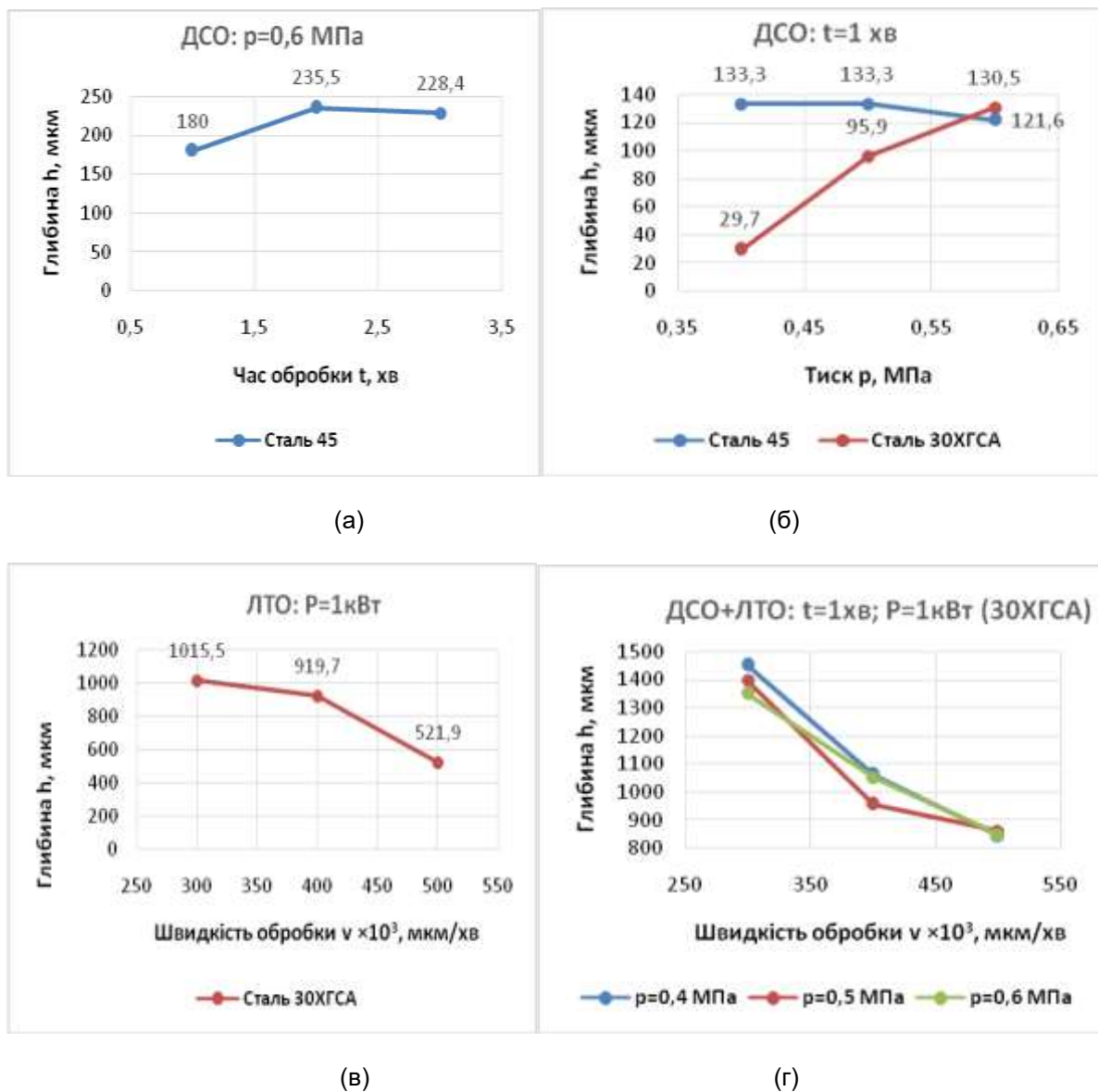


Рис. 2. Зміна глибини зміцнення від часу ДСО (а), тиску при ДСО (б) та швидкості переміщення оброблюваного зразка при ЛТО (в) та комбінованої ДСО+ЛТО (г)

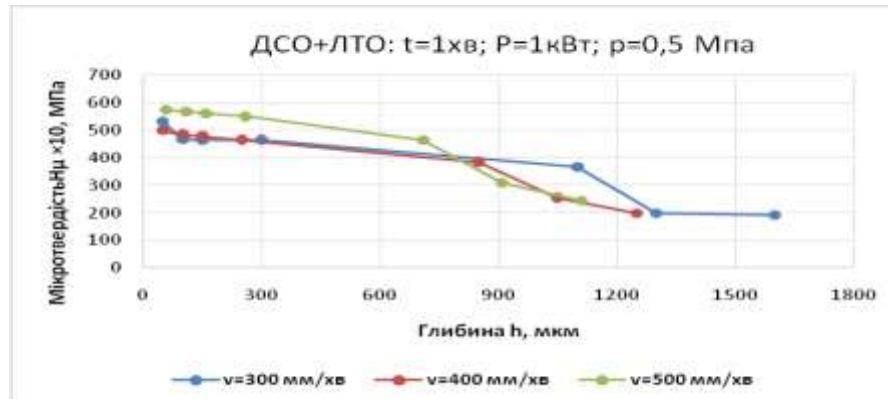


Рис. 3. Розподіл мікротвердості у приповерхневому шарі сталі 30ХГСА

Отримані результати показали (рис. 2), що у порівнянні з окремою ЛТО сталі 30ХГСА комбінована ДСО+ЛТО веде до збільшення глибини зміцнення у 1,5 рази за рахунок покращення поглинальної здатності лазерного випромінювання, яке досягнуто формуванням спеціального мікрорельєфу на поверхні. Одночасно, забезпечується твердість поверхневого шару  $\sim 5400$  МПа (рис. 3). Оптимальна потужність лазерного променя складає 1 кВт при швидкості переміщення зразка 300 мм/хв. Одночасно, формується поверхневий шар [11] на глибині 1,3 мм з твердістю значно вищою, ніж при роздільних методах поверхневого зміцнення. До того ж, глибина гартованого шару зменшується із збільшенням швидкості ЛТО (рис. 3). Область оптимальних режимів ДСО: тиск подачі газокуюлькового потоку  $p = 0,5$  МПа, час ДСО  $t = 60$  с (1 хв).

Використання запропонованого комбінованого методу поверхневої обробки імпульсною ударною дією газокуюлькового високошвидкісного потоку та наступною термічною дією лазерним променем (гартування без оплавлення) сприятиме підвищенню ефективності поверхневого зміцнення інструментів із сталі 30ХГСА за рахунок збереження дефектів, створених попереднім пластичним деформуванням.

**Висновки.** У ході проведеного дослідження було запропоновано новий спосіб термомодеформаційного поверхневого зміцнення металевих виробів з використанням дробоструминної обробки та лазерної термообробки.

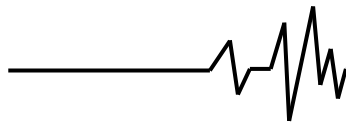
Отримані результати експериментальних досліджень, з використанням методу математичного планування експерименту, дозволили звузити область технологічних режимів як для ДСО, так і для ЛТО, виходячи з максимальної глибини, а також дозволили встановити оптимальні режими комбінованої обробки (ДСО+ЛТО) для сталі 30ХГСА. Так, оптимальними режимами для комбінованого термомодеформаційного зміцнення без оплавлення

є тиск на вході сопла 0,5 МПа, час ДСО 1 хв, потужність лазера 1 кВт та швидкість обробки 300 мм/хв.

Визначено, що комбінована ДСО+ЛТО при оптимальних режимах формує рівномірну мікроструктуру поверхневого шару на глибині 1,3 мм з твердістю значно вищою, ніж при роздільних методах поверхневого зміцнення.

#### Список використаних джерел

1. Кривцун И. В. Гибридные лазерно-плазменные процессы сварки и обработки материалов. *Збірник наукових праць НУК*. 2009. № 3. С. 13-27.
2. Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel / D. A. Lesyk et al. *Surface and Coating Technology*. 2015. Vol. 278. P. 108-120.
3. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / за ред. Л.Ф. Головка, С.О. Лук'яненко. Київ : Вістка, 2009. 296 с.
4. Хлынин П. П. Совершенствование конструктивно-режимных параметров дробилки молоткового типа : автореф. дис. на соискание уч. степени кан. тех. наук : 05.20.01, 05.20.03. Оренбург, 2003. 20 с.
5. Combined laser-ultrasonic surface hardening process for improving the properties of metallic products / V.V. Dzhemelinskyi et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing : Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018, June 12-15, 2018, Sumy, Ukraine*. Springer, Cham, 2019. P. 97-107.
6. Nanostructured tool steel fabricated by combination of laser melting and friction stir processing / J. Morisada et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2009. Vol. 505. P. 157-162.
7. Laser transformation hardening effect on hardening zone features and surface hardness of tool steel AISI D2 / D. A. Lesyk et al. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2017. № 1 (79). P. 26-33.
8. Барчуков Д.А. Обоснование выбора материала корпуса и режущей части инструмента



при его изготовлении с помощью наплавки и поверхностного пластического деформирования. *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования* : межвуз. сб. науч. тр. / под ред. В. В. Измайлова. Тверь : ТвГТУ, 2013. Вып. 6. С. 134-139.

9. Третяк А. А. Технология упрочнения буровых коронок. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016. № 16. С. 121-130.

10. Костромин С. В., Шатилов И. Р. Влияние скорости лазерной закалки на структуру и свойства стали 30ХГСА. *SWorld*, 2013. URL: <https://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-313/metals-and-energy-313/19464-313-0715> (дата звернення: 23.02.2020).

11. Данилейко О. О., Джемелінський В. В., Лесик Д. А. Поліпшення якості поверхневого шару сталі 30ХГСА комбінованою лазерно-деформаційною обробкою. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта* : зб. матеріалів VII Міжнар. наук.-техн. конф., 5-9 лютого. 2018 р. Львів-Звенив, 2018. С. 41-44.

12. Surface hardening and finishing of metallic products by hybrid laser-ultrasonic treatment / V. V. Dzhemelinskiy, D. A. Lesyk, O. O. Goncharuk, O. O. Danyleiko. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 12 (91), Vol. 1. P. 35-42.

13. Джемелінський В. В., Лесик Д. А. Визначення оптимальних параметрів лазерно-ультразвукового зміцнення та оздоблювання поверхонь виробів. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Сер. *Машинобудування*. Київ. 2013. № 2 (68). С. 15-18.

14. Визначення оптимальних режимів комбінованого лазерно-ультразвукового зміцнення інструментальної сталі Х12МФ / Д. А. Лесик та ін. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер. *Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків : НТУ «ХПІ». 2017. № 23 (1245). С. 27-35.

### Reference

1. Krivtsun, I.V. (2009). Gibridnye lazerno-plazmennye protsessy svarki i obrabotki materialov [Hybrid laser-plasma welding and material processing processes]. Mykolajiv: Ghelvjetyka [in Russian].

2. Lesyk, D.A., Martinez, S., Dzhemelinskiy, V.V., Lamikiz, A., Mordiyuk, B.N., Prokopenko, G.I. (2015). Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel. Netherlands: Elsevier Science Publishing Company. (Vol. 278), (pp. 108-120).

3. Gholovko, L.F. (2009). Lazerni tekhnologhiji ta komp'juterne modeljuvannja [Laser

technologies and computer simulation]. L.F. Gholovko, S.O. Luk'janenko (Ed.). Kyjiv: Vistka [in Ukrainian].

4. Khlynyn, P.P. (2003). Sovershenstvovanye konstruktivno rezhymnykh parametrov drobylky molotkovoho typu [Improving the structurally operational parameters of the hammer type crusher]. Extended abstract of candidate's thesis. Orenburh [in Russian].

5. Lesyk, D.A., Martinez, S., Dzhemelinskiy, V.V., Danyleiko, O.O., Mordiyuk, B.N. (2018). Combined laser-ultrasonic surface hardening process for improving the properties of metallic products. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing: Proceedings of the International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2018*. (pp. 97-107). Sumy: Springer, Cham.

6. Morisada, J., Fujii, H., Mizuno, T., Abe, G., Nagaoka, T., Fukusumi M. (2009). Nanostructured tool steel fabricated by combination of laser melting and friction stir processing. *Materials Science and Engineering: A*. (Vol. 505), (pp. 157-162).

7. Lesyk, D.A., Dzhemelinskiy, V.V., Martinez, S., Lamikiz, A., Danyleiko, O.O., Hyzhevskiy, V.V. (2017). Laser transformation hardening effect on hardening zone features and surface hardness of tool steel AISI D2 / *Mechanics and Advanced Technologies*, 1 (79), 26-33.

8. Barchukov, D.A. (2013). Obosnovanye vybora materyala korpusa y rezhushchei chasty ynstrumenta pry eho yzgotovlenyy s pomoshchiu naplavky y poverkhnostnoho plastycheskoho deformatsionnoy [The rationale for the selection of the material of the body and the cutting part of the tool during its manufacture using surfacing and surface plastic deformation]. *Mekhanika y fizyka protsessov na poverkhnosti y v kontakte tverdyykh tel, detalei tekhnolohycheskoho y enerhetycheskoho oborudovanyia - Mechanics and physics of processes on the surface and in contact of solids, parts of technological and power equipment*. V.V. Yzmailova (Ed.). Tver: TvNTU, 6, 134 139 [in Russian].

9. Tretiak, A.A. (2016). Tekhnolohiya uprochneniya burovykh koronok [Technology for hardening drill bits]. *Hornyi ynformatsyonno-analytycheskyi biulleten – Mountain News and Analysis Bulletin*, 16, 121 130 [in Russian].

10. Kostromyn, S.V., & Shatykov, Y.R. (2013). Vliyanye skorosty lazernoi zakalky na strukturu y svoistva staly 30KhHSA [The effect of laser hardening speed on the structure and properties of steel 30HGSA]. *SWorld*. Retrieved from: <https://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-313/metals-and-energy-313/19464-313-0715> [in Ukrainian].



11. Danyleiko, O.O., Dzhemelinskyi, V.V., Lesyk, D.A. (2018). Polipshennia yakosti poverkhnevoho шару stali 30KhHSA kombinovanioi lazerno-deformatsiinoi obrobkoioi [Improvement of the quality of the surface layer of steel 30XGSA with the combined laser-deformation processing]. *VII Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferencija «Proghresyvni tekhnologhiji v mashynobuduvanni» – VII International scientific-technical conference «Progressive technologies in mechanical engineering»*, (pp. 41-44). Lviv: LPNU [in Ukrainian].

12. Dzhemelinskyi, V.V., Lesyk, D.A., Goncharuk, O.O., Danyleiko, O.O. (2018). Surface hardening and finishing of metallic products by hybrid laser-ultrasonic treatment. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 12 (91), (Vol. 1), 35-42.

13. Dzhemelinskyi, V.V., Lesyk, D.A. (2013). Vyznachennia optimalnykh parametriv lazerno-ultrazvukovoho zmitsnennia ta ozdoblivannia poverkhon vyrobiv [Determination of optimal parameters of laser-ultrasonic hardening and surface decoration of products]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut»*. Ser. *Mashynobuduvannia - Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*. Avg. *Engineering*, 2 (68), 15-18[in Ukrainian].

14. Lesyk, D.A., Dzhemelinskyi, V.V., Mordiyuk, B.M., Prokopenko, H.I., Danyleiko, O.O. (2017). Vyznachennia optimalnykh rezhymiv kombinovanoho lazerno-ultrazvukovoho zmitsnennia instrumentalnoi stali Kh12MF [Determination of optimal modes of combined laser-ultrasonic hardening of X12MF tool steel]. *Visnyk NTU «KhPI»*. Ser. *Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of NTU "KPI"*. Avg. *New solutions in modern technologies*, 23 (1245), 27-35[in Ukrainian].

#### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

В статье рассмотрены перспективы использования комбинированной термомодеформационной обработки для повышения эксплуатационных свойств металлических изделий. Предложен новый способ термомодеформационного поверхностного упрочнения (дробеструйная обработка (ДСО) с последующей лазерной термообработкой (ЛТО)) для инструментов и корпусов коронок, работающих в сложных условиях. Для проведения экспериментальных исследований были выбраны плоские образцы из стали 30XGSA и стали 45. Предварительное упрочнение и отделку статическими или динамическими методами поверхностно-

пластическим деформированием проводили на модернизированной установке на базе станка с числовым программным управлением «DYNAMITE 2800», а ДСО реализовывали на промышленном оборудовании. Лазерное поверхностное упрочнение образцов проводили одиночными проходами со скоростью перемещения образца 300 ... 500 мм/мин при диаметре лазерного луча 7,3 мм и мощности лазера 1 кВт с использованием технологической установки «ROFIN-SINAR DY 044». Определены оптимальные режимы поверхностного упрочнения при деформационном действии газодинамического потока с твердыми частицами и термическим воздействием лазерным лучом для получения максимальных величин глубины упрочнения и твердости. В частности, при ДСО давление подачи газодульковомого потока составляет 0,5 МПа, продолжительность обработки 1 мин независимо от типа материала. Оптимальная мощность лазерного луча составляет 1 кВт при скорости перемещения образца 300 мм/мин. Приведены результаты экспериментальных исследований изменения глубины упрочнения от времени и давления после ДСО, скорости перемещения обрабатываемого образца с углеродистой стали 45 и среднелегированные стали 30XGSA после ЛТО и комбинированной ДСО+ЛТО, а также распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя. Выявлено, что комбинированная ДСО+ЛТО стали 30XGSA при оптимальных режимах формирует у 1,5 раза (1,3 мм) больше глубину упрочненного поверхностного слоя по сравнению с ЛТО, одновременно обеспечивая твердость поверхностного слоя ~5400 МПа.

**Ключевые слова:** комбинированная термомодеформационная поверхностная обработка, дробеструйная обработка, лазерная термообработка, сталь 30XGSA, сталь 45, глубина упрочнения, твердость

#### INCREASING THE EFFICIENCY OF SURFACE STRENGTHENING OF METAL PRODUCTS BY COMBINED THERMODEFORMATION PROCESSING

The article discusses the prospects of using combined thermal deformation surface processing to improve the performance properties of metal products. There is a new method of thermal deformation surface hardening (shot peening (SP) followed by laser heat treatment (LHT)) for tools and crown housings operating under difficult conditions proposed. For carrying out experimental studies, flat samples of 30KhGSA steel and steel 45 were selected. Preliminary hardening and finishing with static or dynamic methods of surface plastic deformation



were carried out on a modernized installation based on a DYNAMITE 2800 numerical control machine, and SP was implemented on industrial equipment. Laser surface hardening of the samples was carried out in single passes with a sample moving speed of 300...500 mm/min with a laser beam diameter of 7.3 mm and a laser power of 1 kW using the ROFIN-SINAR DY 044 technological unit. The optimal regimes of surface hardening are determined under the deformation action of a gas-dynamic flow with solid particles and thermal action by a laser beam to obtain maximum values of hardening depth and hardness. In particular, with SP, the gas-feed stream feed pressure is 0.5 MPa, the processing time is 1 min, regardless of the type of material. The optimal laser beam power is 1 kW at a sample travel speed of 300 mm/min. There are the results

of experimental studies of the change in the hardening depth as a function of time and pressure after SP, the speed of movement of the treated sample from carbon steel 45 and medium alloyed steel 30KhGSA after LHT and combined SP+LHT, and also the distribution of microhardness over the depth of the hardened layer presented. It is revealed that the combined SP+LHT of 30 KhGSA steel at optimal modes forms 1.5 times (1.3 mm) greater depth of the strengthened surface layer in comparison with LHT, while providing the surface layer hardness of ~5400 MPa.

**Keywords:** *combined thermal deformation surface treatment, shot blasting, laser heat treatment, 30HGSA steel, steel 45, hardening depth, hardness.*

### Відомості про авторів

**Данилейко Олександр Олександрович** – аспірант кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, e-mail: danyleiko.oleksandr@gmail.com)

**Данилейко Александр Александрович** – аспірант кафедры лазерной техники и физико-технических технологий Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (проспект Победы, 37, Киев, 03056, e-mail: danyleiko.oleksandr@gmail.com)

**Danyleiko Oleksandr** – PhD student at the Department of Laser Engineering and Physical Engineering Technologies, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, e-mail: danyleiko.oleksandr@gmail.com)

**Джемелінський Віталій Васильович** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри лазерної техніки та фізико-технічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, e-mail: Vitaly.Dzhemelinsky@gmail.com)

**Джемелинский Виталий Васильевич** – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры лазерной техники и физико-технических технологий Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (проспект Победы, 37, Киев, 03056, e-mail: Vitaly.Dzhemelinsky@gmail.com)

**Dzhemelinskyi Vitaliy** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Laser Engineering and Physical-Technical Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, e-mail: Vitaly.Dzhemelinsky@gmail.com)

**Лесик Дмитро Анатолійович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри лазерної техніки і фізико-технічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (проспект Перемоги, 37, Київ, 03056, e-mail: lesyk\_d@ukr.net)

**Лесик Дмитрий Анатолиевич** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры лазерной техники и физико-технических технологий Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (проспект Победы, 37, Киев, 03056, e-mail: lesyk\_d@ukr.net)

**Lesyk Dmytro** – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Laser Engineering and Physical-Technical Systems, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, e-mail: lesyk\_d@ukr.net)

**Бернацький Артемій Володимирович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту електросварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України (вул. Боженка, 11, Київ, 03680, e-mail: avb77@ukr.net)

**Бернацкий Артемий Владимирович** – кандидат технических наук, научный сотрудник Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины (ул. Боженка, 11, Киев, 03680, e-mail: avb77@ukr.net)

**Bernatskyi Artemii** – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (11 Bozhenko St., Kyiv, 03680, e-mail: avb77@ukr.net)