

Джемелінський В. В. УДК 519.6.681.888

Лесик Д. А.

Гнілицький Я. М.

Національний  
технічний  
університет України  
"Київський  
політехнічний  
інститут"

## ВПЛИВ КОМБІНОВАНОЇ ЛАЗЕРНОЇ І УЛЬТРАЗВУКОВОЇ ІМПУЛЬСНОЇ ДІЇ НА ЗМІНУ МІКРОРЕЛЬЄФУ ТА МІКРОТВЕРДОСТІ МЕТАЛЕВОЇ ПОВЕРХНІ

*Приведены методика и результаты экспериментальных исследований влияния импульсного лазерного излучения без оплавления и ультразвуковых колебаний на изменение микрорельефа и микротвердости поверхностного слоя деталей из бронзы.*

*The presented technique and results of experimental researches of influence of impulse laser radiation without melting and ultrasonic oscillations on change to microrelief and microhardness of a surface layer of details from bronze.*

### Вступ.

Сучасні технологічні процеси виробництва машин та інших виробів повинні надійно забезпечувати їх високі фізико-механічні та експлуатаційні властивості. Відомо, що фізичні, хімічні і механічні властивості поверхневого шару можуть суттєво відрізнятися від властивостей основного матеріалу. Підвищені вимоги до поверхонь виробів, зокрема, міцності, твердості, зносостійкості, корозійної стійкості, створення необхідних внутрішніх залишкових напруг, а також їх микрорельєфу та естетичного вигляду вимагає необхідність розробки нових та поліпшення існуючих технологічних процесів фінішної обробки.

Використання наукоємних лазерних технологій модифікування поверхонь в багатьох випадках забезпечує можливість застосування гнучкого керування структурно-напруженим станом поверхні. Відомі способи поверхневого зміцнення з використанням термічної дії концентрованими потоками енергії (лазерного і плазмового випромінювання) [1, 2], а також динамічної дії з застосуванням низько- та високо частотних коливань і відцентрових прискорень [3].

Використання традиційних методів фінішної обробки в ряді випадків не дозволяють отримати необхідні якісні параметри поверхневого шару. Тому для вирішення даної проблеми для оздоблювально-зміцнювальної

обробки може бути запропоновано комбінований спосіб з використанням суміщеної дії теплової і механічної енергії.

### Аналіз теоретичних досліджень.

Процес комбінованої фінішної обробки супроводжується взаємодіями різних джерел енергії. Для скорочення об'єму експериментальних досліджень при визначенні оптимальних схем та параметрів комбінованих процесів формування поверхневого шару з визначеними властивостями необхідно розглянути критерії стану робочої зони технологічної системи.

Для аналізу стану технологічної системи при комбінованій обробці використано рівняння балансу локальної щільності ентропії  $\rho\varepsilon$  в часі  $\tau$  [4]:

$$\partial(\rho\varepsilon)/\partial\tau + \pm \nabla(\rho\varepsilon \cdot \vec{V}) + \nabla \vec{F}_\varepsilon = \sigma \quad (1)$$

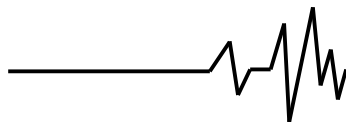
де,  $\vec{F}_\varepsilon$  – щільність потоку ентропії;

$\vec{V}$  – швидкість потоку;

$\nabla$  – оператор Лапласа;

$\sigma$  – похідна ентропії ( $\sigma = \partial\varepsilon/\partial\tau$ ).

А якості моделі формування поверхневого шару, з урахуванням стану робочої зони, самоорганізації комплексу дій концентрованими потоками енергії при комбінованих методах обробки використано [4]:



$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial \tau} + \nabla(\rho \vec{V} \cdot \vec{V}) + \nabla \rho = \rho \sum_{i=1}^k \vec{F}_{m_i} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho l)}{\partial \tau} + \nabla(\rho l \cdot \vec{V}) + \nabla \vec{F}_q = \\ = \rho \sum_{i=1}^k \vec{F}_{m_i} \cdot \vec{F}_d - \rho \vec{V} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \nabla(C_i \cdot \vec{V}) + \nabla \vec{F}_d = \rho \sum_{r=1}^{R_o} V_{i-r} \cdot \omega_r \quad (5)$$

$$\text{в якій } \rho = \sum_{i=1}^k M_i \cdot C_i \quad (6)$$

$$\vec{F}_\varepsilon = (\vec{F}_q - \sum_{i=1}^k \vec{F}_q \cdot \omega_i) / T \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma = \vec{F}_q [\nabla(1/T)] - \\ - \sum_{j=1}^k \vec{F}_d [\nabla(\omega_j/T) - (1/T) \vec{F}_{m_j}] - \end{aligned} \quad (8)$$

$$- (1/T) \vec{P}_g \cdot \nabla \vec{V} + (1/T) \cdot \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot \sum_{r=1}^{R_o} V_{ir} \cdot \omega_r$$

де,  $\rho$  – масова щільність оброблюваного матеріалу;  $\rho \vec{V}$  – щільність імпульсу;  $\rho_e$  – щільність енергії;  $\vec{P}$  – тензор тиску;  $k$  – число компонентів;  $\vec{F}_{m_i}$  – сила мас діюча на  $i$ -й компонент;  $\vec{F}_q$  – щільність теплового потоку;  $\vec{F}_d$  – щільність дифузійного потоку  $i$ -го компоненту;  $R_o$  – число протікаючих реакцій;  $\mathcal{G}_{i-r}$  – стехіометричний коефіцієнт  $i$ -го компоненту  $r$ -й реакції;  $\omega_r$  – швидкість  $r$ -й реакції;  $M_i$  – молекулярна маса  $i$ -го компоненту;  $C_i$  – концентрація  $i$ -го компоненту;  $\omega_i$  – хімічний потенціал  $i$ -го компоненту;  $T$  – абсолютна температура;  $\vec{P}_g$  – дисипативна частка тензора тиску, яка описує в'язкі сили.

Прийнявши граничні умови: незміни характеристики оброблюваного матеріалу, відсутність допоміжних джерел енергії, постійних ненульових швидкостей та інших складових режиму обробки, розв'язок рівнянь (1)...(5) має вигляд [5]:

$$\vec{V} = \nabla \cdot \vec{V}^* \quad (9)$$

тому що  $\nabla \cdot (\nabla \cdot \vec{V}^*) = 0$  або  $\text{div}(\text{rot} \vec{V}^*) = 0$

де,  $\vec{V}^*$  – складова обертання в потоці, яка рухається зі швидкістю  $\vec{V}$ .

Звідси для аналізу процесів структурних змін в поверхневому шарі доцільно використовувати критерії тепломасопереносу [5, 6], а для аналізу зміни властивостей-критерії, які характеризують потоки енергії [7].

#### Мета.

Дослідити вплив комбінованої імпульсної лазерної і ультразвукової дії на зміну мікрорельєфу та мікротвердості поверхневого шару металевих виробів.

#### Методика експериментальних досліджень.

Для проведення експериментів використано спосіб [8], згідно якого лазерно-ультразвукова фінішна обробка здійснюється комбінованою імпульсною дією лазерного випромінювання та динамічною дією багатобійковими наконечниками, несиметрично розміщеними у торці державки, які отримують від ультразвукового генератора височастотні коливання та обертові навколо вісі рухи.

Можливі як роздільна, так і суміщена схеми комбінованої лазерно-ультразвукової обробки.

В даній роботі було використано роздільну схему, згідно з якою спочатку здійснювалася деформаційна дія ультразвуковим інструментом з наступною дією лазерним променем.

З метою інтенсифікації процесу ультразвукової обробки на вихідному торці концентратора ультразвукових коливань (3) розміщувався багатобійковий наконечник (2) із 7-и стержневими бійками виготовленими із сталі ШХ15 (рис. 1).

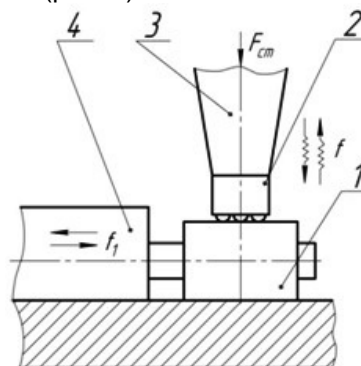
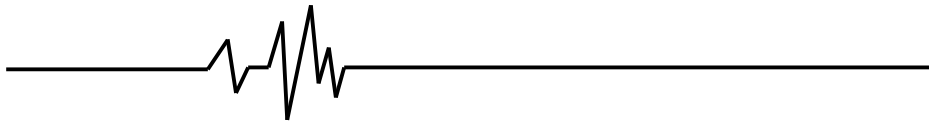
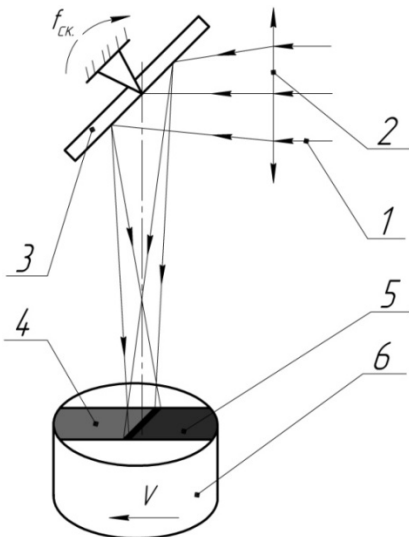


Рис. 1. Схема ультразвукової обробки: 1 – оправа; 2 – багатобійковий наконечник; 3 – концентратор; 4 – пристрій для низькочастотних коливань зразка



Ультразвукові коливання здійснювалися на зразок, який змащувався рідиною з поверхнево-активними речовинами, і встановлений у спеціальному пристрої, що отримував зворотно-поступальний рух з частотою  $f_1 = 15$  Гц.

Термічна імпульсна дія лазерним променем здійснювалась після деформаційної дії ультразвуковими наконечниками (рис. 2).



**Рис. 2. Схема лазерної обробки:**  
1 – лазерний промінь; 2 – фокусує лінза;  
3 – сканатор, 4 – зона ультразвукового впливу;  
5 – зона лазерного впливу;  
6 – експериментальний зразок

В якості досліджуваного матеріалу були використані циліндричні зразки діаметром 18 мм і висотою 10 мм із бронзи БрАЖ9-4. Хімічний склад матеріалу у ваг. %: 2...4 Fe, до 0.1 Si, до 0.5 Mn, до 0.01 P, 8...10 Al, 84...90 Cu, до 0.01 Pb, до 1 Zn, до 0.1 Sn. Границя міцності  $\sigma_B = 500...700$  МПа, температура плавлення  $T = 1040$  °С.

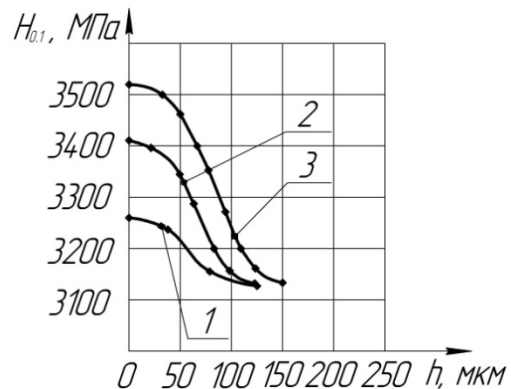
Для ультразвукової обробки використовувався – генератор УЗГ250 з п'єзокерамічними перетворювачами. Статична сила навантаження ультразвукового інструменту змінювалась від 10 до 40 Н. Частота ультразвукових коливань дорівнювала 18...22 кГц.

Для термічної дії використовувався лазер «Квант 15» з довжиною хвилі випромінювання  $\lambda = 1.06$  мкм. Лазерний промінь фокусувався в пляму діаметром 2 мм. Швидкість переміщення зразка відносно лазерного променя  $V = 1$  мм/с. Енергія в імпульсі  $E$  змінювалась від 3 до 11 Дж, що забезпечувало поверхневу обробку без

оплавлення при тривалості імпульсу  $\tau = 4$  мс. Коефіцієнтом перекриття дорівнював 0.5...1. Зразки попередньо змащувалися спиртовим розчином пікринової кислоти.

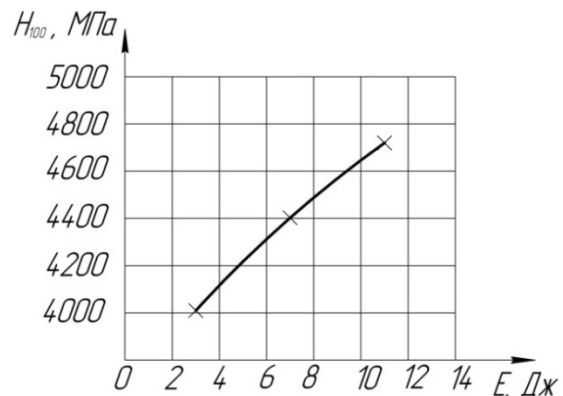
Для вимірювання мікрорельєфу поверхневого шару використовувався мікроскоп МИС-11, а для визначення мікротвердості – прилад ПМТ-3, а для шорсткості – спеціальний модуль на основі профілометра мод. 296.

Результати експериментальних досліджень зміни мікротвердості в залежності від глибини поверхневого шару (рис. 3) підтвердили теоретичні передбачення, що комбінована лазерно – ультразвукового дія сприяє формуванню більш твердих та глибших поверхневих шарів в порівнянні з окремою ультразвуковою і лазерною дією.

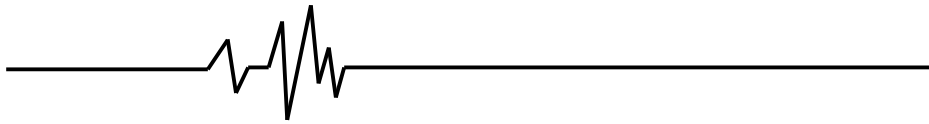


**Рис. 3. Залежність мікротвердості від глибини при ультразвуковій (1), лазерній (2) та лазерно-ультразвуковій дії (3)**

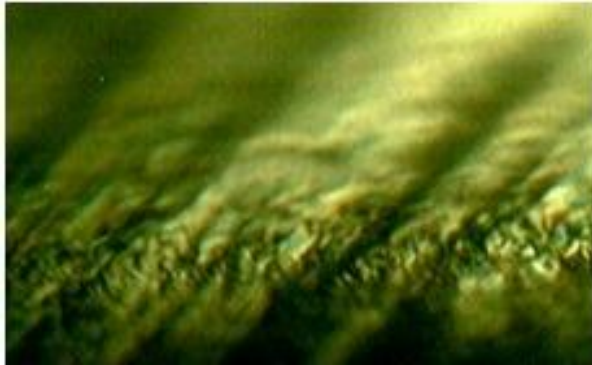
Поверхнева мікротвердість при збільшенні енергії імпульсу лазерного променя даного методу оздоблювально-зміцнювальної обробки без оплавлення також підвищилась за рахунок зміни поверхневої енергії зразка (рис. 4).



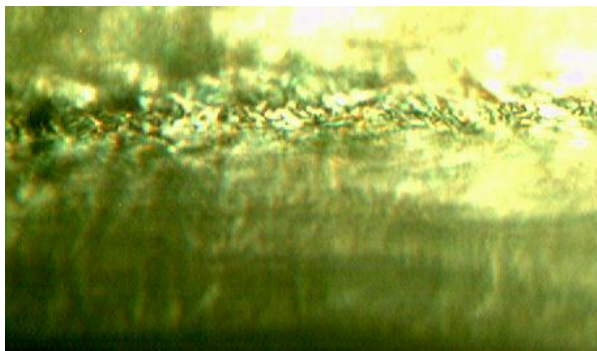
**Рис. 4. Залежність поверхневої мікротвердості від енергії імпульсу**



Комбінована дія лазерного імпульсного променя та ультразвукового багатобілкового наконечника приводить також до значної зміни мікрорельєфу поверхні (рис. 5, 6). Це явище пояснюється ущільненням поверхневого шару та виникненням залишкових напружень.



**Рис. 5. Мікрорельєф поверхні до обробки**



**Рис. 6. Мікрорельєф поверхні після лазерно-ультразвукового впливу**

Комбінована термодформаційна дія сприяла також значній зміні ступеню нагартування та параметра шорсткості поверхневого шару (табл. 1).

**Таблиця 1  
Експериментальні результати ступеню нагартування та шорсткості поверхневого шару**

Технологія обробки зразків	Ступінь нагартування, %	Шорсткість, $R_a$
До обробки	-	1.42
УЗО	5.16	0.82
ЛО	12.25	1.15
УЗО+ЛО	13.55	0.97

**Висновки.**

Дослідження показали, що комбінована термодформаційна дія лазерного імпульсного випромінювання і ультразвукового коливання сприяють інтенсифікації процесів нагартування, а також зміні мікрорельєфу поверхні. Зокрема, ступінь нагартування поверхні зразка із БрАЖ9-4 після комбінованої лазерно-ультразвукової обробки в порівнянні з поверхневою ультразвуковою обробкою підвищилась більше чим в 2 рази.

Для формування необхідних властивостей поверхневого шару доцільно використовувати спочатку деформаційну дію – ультразвуковими наконечниками, а потім термічну – лазерним променем, а при формуванні необхідного мікрорельєфу – спочатку термічну імпульсну дію лазерного променя і наступну деформаційну дію ультразвуковими наконечниками.

**Література**

1. Технология упрочнения. Технол. Методы упрочнения В 2 т. Т. 2. – М.: «Л.В.М. – СКРИПТ», «МАШИНОСТРОЕНИЕ», 1995.-688 с.: ил.
2. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання/Під ред. Л.Ф. Головка, С.О. Лук'яненко. – К.: Вістка, 2009. – 296 с. – Бібліогр.: с. 239 – 248.
3. А.П. Бабичев, П.Д. Матренко и др. «Применение вибрационных технологий для повышения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей»: Науч. Издание/Под ред. А.П. Бабичева. – Ростов Н/Д.: 2006. – 213с.
4. В.О. Эбелинг «Образование структур при необратимых процессах»: Введение в теорию диссипативных структур. – М.: Мир, 1979. – 279с.
5. П.А. Витязь, М.Л. Хейфец, Е.З. Зевелева, А.М. Пынькин «Моделирование структурных связей комплексу воздействий концентрированными потоками энергии при комбинированной обработке» Наук. Журнал «Технологічні комплекси», №2, 2010. с.72-74.
6. А.С. Телегин, В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко «Термомассоперенос». – М.: Металлургия, 1995. – 400с.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент/под. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина – М.: энергоатомизфиз, 1988. – 560с.
8. Джемелінський В.В., Джемелінська Л.В., Лесик Д.А./Патент UA №60662 U Спосіб лазерно-ультразвукової фінішної обробки/кл. В24В 39/00, 2011.06.