

УДК 621.373.826

Джемелінський В.В. к.т.н., проф., Лесик Д.А. асп.
НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗМІЦНЕННЯ ТА ОЗДОБЛЮВАННЯ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ

Dzhemelinsky V., Lesyk D.
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine, (vitaly.dzhemelinsky@gmail.com,
lesyk_d@ukr.net)

DETERMINING THE OPTIMAL PARAMETERS OF LASER-ULTRASONIC HARDENING AND FINISHING OF THE SURFACES PRODUCTS

Запропоновано методіку для проведення розрахунків температурно-часового режиму термодформаційного циклу пластичного деформування ультразвуковим наконечником в сполученні з високошвидкісним охолодженням після нагрівання лазерним променем при використанні комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки. Приведені залежності для визначення поверхневої температури та необхідного часу дії енергії лазерного променя та ультразвукового наконечника при заданій глибині зміцнення для отримання оптимальних параметрів, які забезпечать підвищену твердість (міцність), мікрометричні і зносостійкі характеристики поверхневого шару для сталевих виробів та тугоплавких металів і їх сплавів.

Ключові слова: комбінована лазерно-ультразвукова обробка, поверхневий шар, лазерне зміцнення без оплавлення, енергія активації, поверхнева температура.

Вступ. Вимоги, які пред'являються на сучасному етапі до якісних та експлуатаційних характеристик поверхневого шару сталевих виробів або деталей настільки високі, що використання традиційних методів обробки в ряді випадків не дозволяє отримати необхідні параметри поверхневого шару традиційними методами обробки. Вирішення цих проблем значною мірою пов'язано зі зміною структури та властивостей поверхневих шарів виробів.

У зв'язку з цим в сучасному виробництві стали частіше використовуватись гібридні та комбіновані методи обробки, які поєднують, дії поверхнево-пластичного деформування (ППД) з термічним нагріванням лазерним, електронним та плазмовим джерелами енергії. В основі даного підходу лежить ідея комплексного використання переваг і нівелювання недоліків різних методів при одночасному або послідовному проведенні різноманітних технологічних процесів.

Застосування лазерних технологій для поверхневого зміцнення різних деталей машин і механізмів є одним із ефективніших способів у виробничому процесі [1, 2, 3]. Разом з тим для збільшення надійності і ресурсу роботи відповідальних деталей та виробів використання вказаної технології не забезпечує одержання зміцненого шару що володіє одночасно високою дисперсністю, твердістю структури, заданою глибиною, гарантованими стискаючими залишковими напруженнями та необхідною шорсткістю.

Для отримання поверхневого шару з високими фізико-механічними властивостями доцільно використовувати лазерне термодформаційне зміцнення, сутність процесу якого полягає в тому, що лазерне випромінювання, сфокусоване в пляму круглої або прямокутної форми, при відносному переміщенні нагріває поверхневий шар матеріалу деталі з наступним статичним [3] або динамічним деформуванням [4].

Мета. Визначення технологічних параметрів комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки з використанням температурно-часового режиму термодформаційного поверхневого зміцнення.

Дослідження. При використанні комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки (ЛУЗОЗО) з використанням дії лазерного променя та ультразвукового концентратора з наконечником необхідно кількісно оцінити роботу для ефективного зміцнення та оздоблювання поверхневого шару:

$$A_{дон}^* = U_{дон}^* \cdot t_{дон}^* \quad (1)$$

де $U_{дон}^*$ - гранично допустима енергія лазерно-ультразвукового впливу ($U_{дон}^* = U_{лн} + U_{узкн}$, де $U_{лн}$ та $U_{узкн}$ - енергія відповідно лазерного променя та ультразвукового концентратора з наконечником);

$t_{дон}^*$ - гранично допустимий час обробки.

Загальна гранично допустима теплова енергія лазерного променя розраховується [5]:

$$U_{лн} = I_{дон} \cdot f_{ли} \cdot n, \quad (2)$$

де $I_{дон}$ - допустима щільність потужності лазерного променя; $f_{ли}$ - частота лазерних імпульсів; n - кількість лазерних імпульсів на тому ж місці.

А енергія ультразвукової імпульсної дії наконечника розраховується [6]:

$$U_{узк} = 2\pi^2 \cdot f^2 \cdot \xi^2 \cdot m_i, \quad (3)$$

де f і ξ - частота і амплітуда ультразвукових коливань; m_i - маса інструменту.

Для практичного визначення оптимальних параметрів, які забезпечать підвищену твердість (міцність), мікрогеометричні і зносостійкі характеристики поверхневого шару сталей виробів або деталей запропоновано використати температурно-часову залежність термодформаційного циклу пластичного деформування ультразвуковим наконечником в сполученні з високошвидкісним охолодженням після дії лазерного променя (рис. 1).

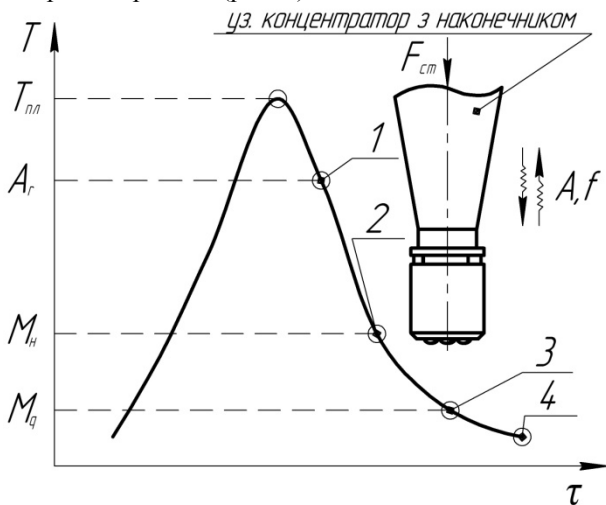


Рис. 1. Схема температурно-часового термодформаційного циклу комбінованої ЛУЗОЗО сталей виробів ($T_{пл}$ - температура плавлення; A_r - температура солідусу; M_n - температура початку мартенситного перетворення; M_q - температура кінця мартенситного перетворення; τ - час дії джерела тепла)

Термодформаційне зміцнення ультразвуковим наконечником в сполученні з високошвидкісним охолодженням сталі можна здійснити на різних ділянках температурно-часового циклу ЛУЗОЗО:

- 1 – високотемпературна деформація;
- 2 – середньотемпературна деформація;
- 3 – низькотемпературна деформація;
- 4 – деформація при температурі навколишнього середовища.

Співвідношення між температурою поверхні T і щільністю потужності лазерного променя q визначається згідно рівняння теплопровідності [7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - a \cdot \Delta T = \frac{Q(x, y, z, t)}{\rho \cdot c}, \quad (4)$$

де Δ - оператор Лапласа ($\Delta = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$); Q -

об'ємна щільність поглинаючого світлового потоку; ρ - щільність; c - теплоємність; a - температуропровідність.

Для розв'язання рівняння (3) необхідно задати одну точкову умову, 6 граничних та визначити $Q(x, y, z, t)$.

$$T_{x,y,z,0} = T_n, \quad T_{x=\infty,t} = T_{y=\infty,t} = T_{z=\infty,t} = T_n,$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial y_{0,t}} = \frac{\partial T}{\partial z_{0,t}} = 0 \quad (5)$$

Після розв'язання системи цих рівнянь зв'язок між T і q виражається у вигляді:

$$T = f \left[\begin{matrix} q(1-R) \\ \rho, c, a, R, \alpha \\ x, y, z, t \end{matrix} \right],$$

де $q(1-R)$ - поглинена потужність; ρ, c, a, R, α - теплофізичні і оптичні параметри; x, y, z, t - аргументи.

Для металів розв'язання рівняння (4) при умовах (5) для круглого джерела тепла – лазерної плями з радіусом r_0 , буде:

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{\alpha\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) + T_n, \quad (6)$$

при $r_0 \gg \sqrt{\alpha\tau}$ (імпульсний нагрів):

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{\alpha\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_n, \quad (7)$$

при $r_0 \ll \sqrt{\alpha\tau}$ (безперервний нагрів):

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_n, \quad (8)$$

При визначенні оптимальної температури зміцнення $T_{зм}$ при використанні температурно-часового термодформаційного циклу необхідно врахувати підвищення температури деформаційної дії ультразвукового наконечника:

$$T_{зм} = (T - T_{узк}), \quad (9)$$

де $T_{узк}$ - температура деформаційної дії ультразвукового наконечника.

Формули (6) і (7) дозволяють розраховувати так названу граничну (критичну) щільність потужності $q^{зрн}$, яка необхідна для нагріву поверхні до заданої температури T , як для імпульсного $q_{імн}^{зрн}$ так і неперервного $q_{непр}^{зрн}$ світлового потоку:

$$q_{імн}^{зрн} = \frac{(T - T_n)k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{\alpha\tau}} \quad (10)$$

$$q_{непр}^{зрн} = \frac{(T - T_n)k}{(1-R)r_0} \quad (11)$$

Якщо відома потрібна глибина $\tau_{зм}$ зміцнення можна визначити необхідний час дії джерела тепла τ [8]:

$$\tau_{зм} = \frac{\pi z_{зм}^2}{4a} \left(\frac{T_{пл}}{T_{пл} - T_{зм}} \right)^2, \quad (12)$$

де $T_{пл}$ - температура плавлення матеріалу; $T_{зм}$ - температура зміцнення; a - температуропровідність матеріалу.

Для визначення оптимальних параметрів ЛУЗОЗО тугоплавких металів та їх сплавів використано рівняння зміни твердості від температури [8, 9]:

$$H_\mu = A \cdot T^{1/3} \cdot \exp\left(\frac{U}{kT}\right), \quad (13)$$

де A - постійна; T - температура, °K; U - енергія активації; k - постійна Больцмана.

Шляхом заміни $\frac{U}{kT} = \frac{\alpha}{t}$, рівняння (13) можна привести до виду:

$$H = A \cdot T^{1/3} \cdot \exp\left(\frac{\alpha}{3t}\right), \quad (14)$$

де $\alpha = \frac{U}{kT_{пл}}$; $t = \frac{T}{T_{пл}}$, де α - корегується зі ступенем направленості міжатомних зв'язків та характеризує пластичність і властивості матеріалів.

Зміну твердості з температурою можна представити:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{H}{3t} \left(1 - \frac{\alpha}{t}\right), \quad (15)$$

Звідси відносне зменшення твердості від температури визначається рівнянням:

$$-\frac{1}{H} \cdot \frac{dH}{dt} = \frac{\alpha}{3t^2} - \frac{1}{3t}, \quad (16)$$

А критичну величину коефіцієнта t^* можна оцінити, прийнявши $-\frac{1}{H} \cdot \frac{dH}{dt} = C$ і розв'язавши рівняння (16):

$$t^* = \frac{-1 \pm \sqrt{1 + 12C \cdot \alpha}}{6C}, \quad (17)$$

Для формування лазерним і ультразвуковим джерелами енергії на поверхні зразка максимальної величини зміцнення без оплавлення поверхнева температура ($T_{зм}$) карбідів тугоплавких металів розраховується:

$$T_{зм} = (T_{пл} - T_{узк}) \cdot t^*, \quad (18)$$

де $T_{пл}$ - температура плавлення матеріалу, °K; $T_{узк}$ - температура деформаційної дії ультразвуковим наконечником, °K.

Висновки. Запропоновані методики для практичного визначення оптимальних параметрів комбінованої лазерно-ультразвукової оздоблювально-зміцнювальної обробки сталей з використанням температурно-часового термодеформаційного циклу та температурної залежності твердості для тугоплавких металів та їх карбідів. Приведені залежності для визначення поверхневої температури та необхідного часу дії енергії лазерного променя та ультразвукового наконечника при заданій глибині зміцнення для отримання оптимальних параметрів, які забезпечать підвищену твердість (міцність), мікрометричні і зносостійкі характеристики поверхневого шару для сталей та тугоплавких металів і їх сплавів.

Анотація. Предложена методика для проведения расчетов температурно-временного режима термодеформационного цикла деформирования ультразвуковым наконечником в сочетании с высокоскоростным охлаждением после нагрева лазерным лучом при использовании комбинированной лазерно-ультразвуковой отделочно-упрочняющей обработки. Приведенные зависимости для определения поверхностной температуры и необходимого времени воздействия энергии лазерного луча та ультразвукового наконечника при заданной глубине упрочнения для получения оптимальных параметров, которые обеспечат повышенную твердость (прочность), микрометрические и износостойкие характеристики поверхностного слоя для сталей и тугоплавких металлов и их сплавов.

Ключевые слова: комбинированная лазерно-ультразвуковая обработка, поверхностный слой, лазерное упрочнение без оплавления, энергия активации, поверхностная температура.

Abstract. The determination of technological parameters of the combined laser-ultrasonic finishing-hardening processing using temperature-time mode thermo-deformation surface hardening.

The study is based on using combined of laser-ultrasonic finishing-hardening processing with using the laser beam and ultrasonic concentrator with a tip namely to evaluate the productivity of the effective hardening and finishing of the surface layer. The methods for calculating the temperature-time mode thermo-deformation cycle plastic deformation ultrasonic tip in combination with high cooling after heating laser beam using combined laser-ultrasonic finishing-hardening processing are suggested. Dependences for the definition of the surface temperature and the time required energy of the laser beam ultrasonic pin at a given depth of strengthening for receiving the optimal parameters, which will provide increased hardness (strength), micrometrical and wear resistant characteristics of the surface layer for steel products and refractory metals and their alloys are presented. The combined method of laser-ultrasonic finishing-hardening processing can use for responsible details of different purpose are suggested.

Keywords: combined laser-ultrasonic processing, the surface layer, laser hardening without melting, the activation energy, the surface temperature.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Григорьянц А. Г. Методы поверхностной лазерной обработки / А. Г. Григорьянц, А. Н. Сафонов – М.: Высшая школа, 1987. – 191 с.
2. Коваленко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера / В. С. Коваленко, Л. Ф. Головка, В. С. Черненко. - К.: Техника, 1990. – 192 с.
3. Головка Л. Ф. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під ред. Л. Ф. Головка, С. О. Лук'яненко. – К.: Вістка, 2009. – 296 с.
4. Пат. 60662 U України, МКП В24В 39/00. Спосіб лазерно-ультразвукової фінішної обробки / Джемелінський В. В., Джемелінська Л. В., Лесик Д. А. / Заявл. 01.12.2010, Опубл. 25.06.2011. Бюл.№12. – 2 с.
5. Mordyuk B. and ether, Mater. Sci. Eng. 458 (2007) 253 p.
6. Mordyuk B., Prokopenko G., J. Sound Vib. 308 (2007) 855 p.
7. Парфенов В. А. Лазерная микрообработка материалов. Учеб.пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011,–С. 4-7.
8. Ковальченко М. С. Известия АН СССР. Неорганические материалы / М. С. Ковальченко, В. В. Джемелинский, В. Н. Скуратовский, Ю. Г. Ткаченко / Том 9. – М.: 1973. – С. 1712-1716.
9. Мордовец Н. М. Температурная зависимость твердости интерметаллидов с участием Al и некоторых эвтектических сплавов на их основе / Н. М. Мордовец. – Доклады НАН Украины, 2008, – № 10. – С. 106-111.

References

1. Grigor'janc A. G. Metody poverhnostnoj lazernoj obrabotki (Methods of surface laser processing). A. G. Grigor'janc, A. N. Safonov. Moscow. Vysshaja shkola, 1987. 191 p.
2. Kovalenko V. S. Uprochnenie i legirovanie detalej mashin luchom lazera (Hardening and alloying of machine parts with a laser beam). V. S. Kovalenko, L. F. Golovko, V. S. Chernenko. Kyiv. Tehnika, 1990. 192 p.
3. Golovko L. F. Lazerni tehnologii' ta komp'juterne modeljuvannja (Laser technology and computer modeling). Kyev. Vistka, 2009, 296 p.
4. Dzhemelins'kyj V. V., Dzhemelins'ka L. V., Lesyk D. A. Sposib lazerno-ul'trazvukovoi' finishnoi' obrobky [Method of laser-ultrasonic finishing processing]. Patent Ukraine no 60662 U. 25.06.2011.
5. Mordyuk B., Prokopenko G., J. Sound Vib, 2007, no 308, 855 p.
6. Mordyuk B. and other, Mater. Sci. Eng, 2007, no 458, 253 p.
7. Parfenov V. A. Lazernaja mikroobrabotka materialov (Laser microprocessing of materials) Ucheb. posobie. SPb. Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2011, pp. 4-7.
8. Koval'chenko M. S., Koval'chenko M. S., Dzhemelinskij V. V., Skuratovskij V. N., Ju. G. Tkachenko Ju. G. Izvestija AN SSSR. Neorganicheskie materialy (Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Inorganic Materials) Tom 9, Moskva. 1973, pp 1712-1716.
9. Mordovec N. M. Temperaturnaja zavisimost' tverdosti intermetallidov s uchastiem Al i nekotoryh jevtekticheskikh splavov na ih osnove (Temperature dependence of the hardness of the intermetallic compounds with Al and some eutectic alloys based on these) Doklady NAN Ukraine, 2008, no 10, pp 106-111.